



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Postgrado de Ingeniería

**OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SILOS DE  
HOMOGENIZACIÓN TIPO CP PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO  
ENERGÉTICO EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA**

**Inga. Rocío Elizabeth Reyna Rodríguez**

Asesorado por: Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Guatemala, diciembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SILOS DE  
HOMOGENIZACIÓN TIPO CP PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO  
ENERGÉTICO EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**INGA. ROCÍO ELIZABETH REYNA RODRIGUEZ**  
**ASESORADO POR EL ING. ADOLFO NARCISO GRAMAJO ANTONIO.**

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRA EN INERGIÁ Y AMBIENTE**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Víctor De León Contreras
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **Honorable Tribunal Examinador**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**Optimización de la Operación del Sistema de Silos de Homogenización Tipo CP para la Disminución del Consumo Energético en una Industria Cementera**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado, con fecha de 12 octubre 2012.



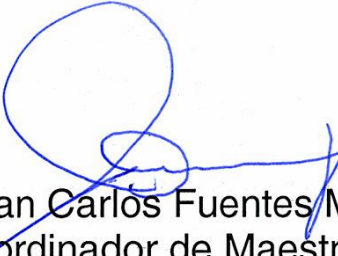
**Rocío Elizabeth Reyna Rodríguez**



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios  
De Postgrado  
Teléfono 2418-9142

Como Coordinador de la Maestría en Energía y Ambiente y revisor del Trabajo de Tesis titulado **“OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE HOMOGENIZACIÓN TIPO CP PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA”**, presentado por la Ingeniera Química **Rocío Elizabeth Reyna Rodríguez**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

  
MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepéque  
Coordinador de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, noviembre de 2013.

Cc: archivo  
/la



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios  
De Postgrado  
Teléfono 2418-9142

Como Revisor de la Maestría en Energía y Ambiente del Trabajo de Tesis titulado **“OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE HOMOGENIZACIÓN TIPO CP PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA”**. Presentado por la Ingeniera Química **Rocío Elizabeth Reyna Rodríguez**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

*“ID Y ENSEÑAD A TODOS”*



Dra. Mayra Virginia Castillo Montes  
Directora  
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, noviembre de 2013.

Cc: archivo  
/la



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios  
De Postgrado  
Teléfono 2418-9142

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **“OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE HOMOGENIZACIÓN TIPO CP PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA”** presentado por la Ingeniera Química **Rocío Elizabeth Reyna Rodríguez**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

*“ID Y ENSEÑAD A TODOS”*

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes  
Directora  
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, noviembre de 2013.

Cc: archivo  
/la



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Energía y Ambiente titulado: **“OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE SILOS DE HOMOGENIZACIÓN TIPO CP PARA LA DISMINUCIÓN DEL COSNUMO ENERGÉTICO EN UNA INDUSTRIA CEMENTERA”**, presentado por la Ingeniera Química **Rocío Elizabeth Reyna Rodríguez**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, noviembre de 2013.



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Jesús**

Amor de mi vida quien coloca sueños en mi corazón y los hace realidad, quien con su mano me sostiene para caminar juntos en las buenas y en las malas, quien es aquél que me cuida con un amor tan puro y por quien vivo cada día de mi vida.

**Mi madre**

Quien con ese amor incondicional, me cuida y siempre desea lo mejor para mí, quien es mi apoyo, mi mejor amiga y compañía.

**Manuel Cazali**

Agradezco al hombre de mi vida quien Dios colocó en mi camino para ser mi compañero, mi amor quien con todo su ser, ha logrado completarme para hacerme feliz y a quien espero con todo mi corazón hacerlo inmensamente feliz.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por la fuerza que me dio para llevar este proceso y por el amor con el que siempre me sostiene.
<b>Mi madre</b>	Por la ayuda y motivación que siempre me dio.
<b>Dr. Adolfo Narciso Gramajo</b>	Mi asesor, por su ayuda, consejos y por ser mi mentor y mi ejemplo a seguir.
<b>Manuel Cazali</b>	Mi novio, con quien se me hizo grato compartir la maestría, por entenderme y ser tan dulce conmigo.
<b>Compañeros y amigos</b>	Por compartir entre todos las clases y experiencias agradables.
<b>Ing. Yvan Pecorelli</b>	Por su ayuda, enseñanza, paciencia y por no ser egoísta con su conocimiento.



# Índice General

Índice General.....	I
Índice de Ilustraciones .....	V
Lista de Símbolos .....	IX
Glosario.....	XI
Resumen.....	XV
Objetivos .....	XVII
Hipótesis .....	XVII
Introducción .....	XIX
1. Antecedentes .....	1
2. Definición del problema.....	5
3. Marco Teórico .....	9
3.1. Proceso de fabricación de cemento .....	9
3.1.1. Operaciones básica en la fabricación del cemento .....	9
3.1.2. Química de la fabricación del cemento.....	21
3.1.3. Materias primas.....	22
3.1.4. Harina cruda.....	23
3.1.5. Componentes del Clinker.....	28
3.1.6. Reacciones en la formación de Clinker.....	32
3.2. Silos .....	33
3.2.1. Silo de homogenización .....	34
3.2.2. Forma de operación de un silo de homogenización .....	37
3.2.3. Sistema de aireación.....	39

3.2.4.	Mezclado en silos .....	42
3.3.	Consumos de energía en una industria de fabricación de cemento	43
3.3.1.	Medidas de ahorro de energía.....	46
3.3.2.	Ahorro de energía en las operaciones básicas de la industria del cemento .....	46
3.4.	Aspectos ambientales .....	51
3.5.	Cambio climático .....	52
4.	Diseño Metodológico .....	55
4.1.	Ubicación geográfica .....	55
4.2.	Definición las variables dependientes en el proceso.....	55
4.3.	Variables independientes cuantitativas .....	56
4.4.	Delimitación del campo de estudio.....	56
4.4.1.	Población .....	57
4.4.2.	Muestra.....	57
4.5.	Recursos disponibles .....	58
4.6.	Fases.....	59
4.6.1.	Fase I recopilación de datos: estimación de datos de energía .....	59
4.6.2.	Fase II experimental: estimación de condiciones óptimas de operación en el sistema CP.....	59
4.6.3.	Fase III recopilación de datos: estimación de datos de costos .....	72
4.7.	Técnica cuantitativa .....	73
4.8.	Procesamiento de la información .....	73
4.8.1.	Plan de tabulación .....	73
4.9.	Análisis estadístico .....	75
4.9.1.	Validez durante el experimento .....	75

Resultados .....	77
Interpretación de resultados .....	81
Conclusiones .....	87
Recomendaciones .....	89
Bibliografía .....	91
Apéndice 1 .....	97
Anexo 1 .....	113





## Índice de Ilustraciones

### Figuras

1.	Producción de energía del SIN (enero-abril 2011)	2
2.	Producción de energía del SIN (mayo-octubre 2011)	3
3.	Cómo obtener condiciones óptimas de operación	6
4.	Operaciones básicas en la fabricación de cemento	10
5.	Preparación de la materia prima	11
6.	Factores que afectan la calidad de alimentación al horno	13
7.	Silo de homogenización	14
8.	Proceso de homogenización	15
9.	Proceso general de fabricación de cemento	21
10.	Puntos de muestreo	22
11.	Rocas sedimentarias / materia prima	23
12.	Diagrama sólido-líquido óxido de Calcio-óxido de Sílice	26
13.	Diagrama sólido-líquido óxido de Calcio-óxido de Aluminio	26
14.	Diagrama sólido-líquido óxido de Sílice-óxido de Aluminio	27
15.	Diagrama sólido-líquido óxido de Calcio-óxido de Aluminio- Óxido de Sílice	27
16.	Alita	28
17.	Belita	29
18.	Aluminato de Calcio	29
19.	Aluminoferrato de Calcio	30
20.	Clinker	31
21.	Diagrama Temperatura-Tiempo de formación de Clinker	31
22.	Reacciones químicas en la formación de Clínger	32

23.	Resultados finales de la homogeneidad de materia prima, desde las materias primas, equipos automatizados y equipos	34
24.	Partes de un silo tangencial de homogenización	35
25.	Techo del silo y distribución de la alimentación del material	36
26.	Sistema de descarga	36
27.	Modo de operación del silo tangencial de homogenización	37
28.	Fluidez del material dentro del silo (entrada del material y formación de embudo)	38
29.	Unidades de aireación	40
30.	Silo, regiones de aireación	41
31.	Mezcla en silos	43
32.	Costos en una industria cementera	44
33.	Muestreo para identificación de eficiencia del silo de homogenización	60
34.	Alimentación convencional de un silo de homogenización y descarga hacia torre de ciclones	63
35.	Alimentación de un silo de homogenización con recirculación y descarga hacia torre de ciclones	63
36.	Reguera	64
37.	Tratamiento 1: recirculación	65
38.	Correlación factor de homogenización en condiciones de recirculación	66
39.	Correlación factor de homogenización en condiciones de NO recirculación	67
40.	Ejemplo de descargas vistas desde dentro del silo	67
41.	Enumeración de las descargas de silo	68
42.	Correlación factor de homogenización en condiciones Secuencia 1	69

43.	Correlación factor de homogenización en condiciones Secuencia 1	70
44.	Aireación dentro del silo	71
45.	Gráfico Consumo energético mensual	77
46.	Gráfico Costo mensual disminuido en consumo energético en la utilización del sistema CP	78
47.	Gráfico de desviación estándar de factor de homogenización, según los tratamientos experimentales	79
48.	Beneficios de la aplicación de un sistema de gestión de energía	90

### **Tablas**

I.	Requerimientos de la preparación de harina cruda	15
II.	Química de harina cruda	25
III.	Distribución de los consumos de energía eléctrica	45
IV.	Valores recomendados desviación estándar de harina cruda	61
V.	Factor de homogenización	62
VI.	Presupuesto para reguera de 2" (0.031m) de ancho	64
VII.	Cuadro de recolección de datos	74
VIII.	Disminución en el consumo energético usando el sistema CP	77
IX.	Costo mensual disminuido en consumo energético en la utilización del sistema CP	78
X.	Índices Financieros del proyecto	79
XI.	Condiciones para mejorar el factor de homogeneidad	80
XII.	Cuadro de recolección de datos	97
XIII.	Potencia compresores silo convencional	97
XIV.	Potencia compresores silo CP	98

XV.	Costo mensual de consumo eléctrico	98
XVI.	Factor de homogeneización, prueba con recirculación	99
XVII.	Factor de homogeneización, prueba sin recirculación	101
XVIII.	Factor de homogeneización, prueba secuencia 1	103
XIX.	Factor de homogeneización, prueba secuencia 2	105
XX.	Factor de homogeneización, prueba 8 minutos de aireación activa	107
XXI.	Factor de homogeneización, prueba 3 minutos de aireación activa	109
XXII.	Desviación estándar de factor de homogeneización en distintos tratamientos	111

## Lista de Símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\alpha$	Ángulo de inclinación
$\approx$	Aproximadamente
$\sigma$	Desviación estándar
$D_{\text{silo}}$	Diámetro del silo
$N_{\text{sec}}$	Número de sectores de aireación
$p_S$	Presión del soplador
$\Delta TS$	Tiempo de aireación de los sectores



## Glosario

- Cemento** Se definen como cementos los conglomerantes hidráulicos que convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como bajo agua.
- Clinker** Sustancia que se obtiene como resultado de la calcinación en horno, de mezclas de calizas arcillosas preparadas artificialmente con adición eventual de otras materias.
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)** El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un gas incoloro de olor penetrante y sabor ácido. Es un componente minoritario de la atmósfera (aproximadamente 3 partes por 10.000). Proviene de la combustión de hidrocarburos, de la fermentación y de la respiración animal. Las plantas lo utilizan para la fotosíntesis de los carbohidratos. La presencia de dióxido de carbono en la atmósfera impide que una parte de la energía radiante que recibe la Tierra vuelva al espacio, produciendo el llamado efecto invernadero.

<b>Fluidificación</b>	La fluidificación es el estado que se produce en un sólido disgregado cuando, atravesado por una corriente de aire en flujo cruzado, este se expande, burbujea y las partículas quedan en suspensión, sin llegar al transporte neumático.
<b>Generador de energía eléctrica</b>	Conjuntos de máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos sobre un estator. Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se genera una fuerza electromotriz (F.E.M.).
<b>Harina cruda</b>	Término para designar a la materia prima triturada y molida antes de pasar a la fase de clinkerización en el proceso de producción de cemento.
<b>LSF</b>	Término utilizado para designar al factor que expresa la cantidad de óxido de calcio presente en el material analizado, respecto a los demás componentes de la materia prima. Se determina a través de un análisis químico.
<b>Material a granel</b>	Aquel producto que no habiendo sido envasado previamente, se mide en presencia del consumidor.
<b>Reguera</b>	Transporte de material sólido a través de una caja de metal cubierta en el fondo con un material parecido a la lona, en donde se ingresa aire para trasegar el material.



**Silo**

Es un espacio creado para el almacenamiento de materiales que se mantienen en condiciones ideales hasta el momento de su comercialización.



## Resumen

En este trabajo de graduación se determinaron las condiciones óptimas de operación del sistema de homogeneización CP, para disminuir el consumo energético de una industria cementera en el área de harina cruda.

Actualmente se cuenta en la industria cementera con dos sistemas de homogeneización, el convencional y el CP. El sistema CP consume menos energía. A través de este trabajo se determinaron las condiciones para que este sistema trabajara produciendo material de la calidad correcta para el uso en el proceso de fabricación de cemento.

Las pruebas consistieron en una serie de tratamientos experimentales para determinar la mejor condición de operación a menor costo por consumo de energía en los equipos del sistema de homogenización utilizado. Se escogieron tres tratamientos experimentales a desarrollar para determinar los que tenían como efecto la mejora en el factor de homogeneidad de la harina cruda. Al final de la prueba experimental se obtuvo como operación óptima un tiempo de aireación de 3 minutos, una secuencia de descarga tipo 2 (ver fase II, Diseño metodológico) y el uso de recirculación de material.



## **Objetivos**

### **General**

Determinar las condiciones óptimas de operación en el sistema CP de homogeneización para disminuir el consumo energético de la industria cementera.

### **Específicos**

- Determinar la disminución en el consumo energético con el sistema CP.
- Determinar las condiciones que mejoran en el factor de homogeneidad de la harina cruda.
- Cuantificar costo por disminución de consumo energético en la utilización del sistema CP.

## **Hipótesis**

### Investigación

Las condiciones óptimas de operación en la homogeneización, disminuyen el consumo energético en la planta cementera.



## Introducción

La industria cementera guatemalteca debe brindar un producto de calidad a los consumidores. Un producto de calidad cumple con los requisitos establecidos por la empresa, uno de estos requisitos es tener un producto homogéneo. En los inicios de la industria cementera en Guatemala, (1890) se invertían esfuerzos por lograr homogeneidad en la fase de producto final, con el tiempo se establecieron operaciones para mejorar la homogeneidad desde etapas anteriores.

Una de las etapas más importantes para lograr la homogeneidad es la fase de almacenamiento de harina cruda<sup>1</sup>. En esta fase se tienen dos clases de equipo para homogeneización, el tipo convencional el cual funciona con compresores de gran capacidad y el tipo CP. El sistema CP es el que consume menor energía en operación, para lo cual es necesario encontrar las condiciones óptimas de operación para que éste entregue un producto homogéneo que ayude a mejorar la estabilidad del proceso en etapas posteriores.

En el presente trabajo se planteó como objetivo general la realización de una investigación para disminuir el consumo energético en la fase de homogenización de harina cruda en una industria cementera; esto a través de la optimización de la operación de un sistema de silos CP de homogenización.

---

<sup>1</sup>Harina cruda: término para designar a la materia prima triturada y molida antes de pasar a la fase de clinkerización en el proceso de producción de cemento.

Para la validación de la disminución del consumo energético, se calculó la energía utilizada en el sistema convencional de silos de homogenización y se comparó con el cálculo del consumo energético en el sistema CP.

El resultado de esta comparación favoreció al sistema CP que consume menor energía por unidad de tiempo. Con este dato se obtuvo el ahorro en costos por la utilización del sistema CP.

El trabajo cuenta con los antecedentes de las investigaciones del tema, así también con la justificación, definición del problema y marco teórico.

El objetivo general se alcanzó por medio de una metodología conformada por tres fases, la primera fue la estimación de datos de energía consumida, en la segunda se encontraron las condiciones óptimas de operación en el sistema, la cual es una fase experimental, consta de pruebas de recirculación, pruebas con tiempos de aireación en los compresores, y diferentes secuencias de descarga en el silo.

La tercera y última fase consistió en la estimación de costos de consumos energéticos de ambos sistemas de homogenización, así como la validez de la instalación para la prueba de recirculación, esto por medio del cálculo del tiempo de retorno de la inversión realizada. Se encontró la condición óptima a través del principal indicador: el factor de homogeneización que representa la uniformidad que hay en el material en la entrada del sistema de silos CP en comparación al material que sale.

Para la obtención de resultados se planificó una duración de 8 meses, detallada en el cronograma de actividades. Se utilizó como recurso la infraestructura, equipos y laboratorio brindado por la empresa de cemento.



## **1. Antecedentes**

El interés por la reducción de uso de energía en el área de mezcla de diferentes materiales a granel continuamente se incrementa en todo el mundo, particularmente en la industria de materiales de construcción.

En 1906, Claudius Peters, ideó soluciones para la provisión de materiales de manipulación, dando como resultado: uno de los centros de investigación, pruebas y capacitación de la fabricación de silos para manejo de materiales y procesamiento de una amplia gama de industrias, incluyendo cemento, yeso, aluminio y acero. Todo esto para garantizar la calidad de los productos

La empresa fabricante de los silos de almacenamiento, Claudius Peters se encarga de asesorar al cliente en cuanto a capacidad del silo, tiempo de vida útil, degradación mínima del material, descarga concéntrica o excéntrica, número de descargas, entre otras variables a tomar en cuenta. Sin embargo, la empresa fabricante no aporta información sobre las condiciones de operación óptimas específicamente para cada planta o proceso de producción para que ésta tenga un consumo mínimo de energía.

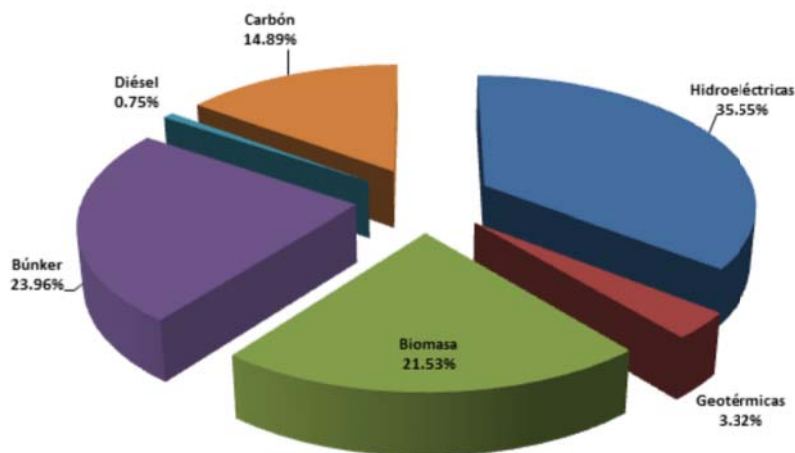
En 1979, Gomá afirma que una vez elegidas las materias primas para obtener una composición adecuada en el cemento, es conveniente que sean constantes en el transcurso de su producción, y esto se consigue mediante sistemas de prehomogeneización y homogeneización en silos de almacenamiento, que permiten obtener un material adecuado a los molinos de mezcla de harina cruda.

El Estado de Guatemala, consciente de los efectos del cambio climático y respetuoso de los compromisos que le deriva la ratificación de La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992, El Protocolo de Kyoto; promueve los programas nacionales de eficiencia energética como medida de mitigación al cambio climático.

En nuestro país el consumo de petróleo representa actualmente un alto porcentaje del total de las fuentes primarias de energía. Dada la tendencia mundial, del continuo incremento de precios de los combustibles derivados del petróleo, y al creciente incremento de la dependencia de nuestro país de estos recursos para generar energía eléctrica, se hace necesario establecer la implementación de un plan de eficiencia energética, que permita atender la producción nacional de las actividades económicas con una menor cantidad de energía.

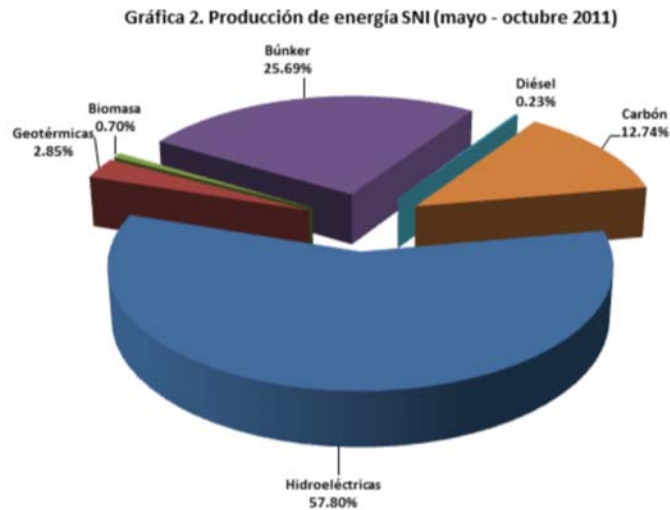
Figura 1. **Producción de energía del SIN (enero-abril 2011)**

Gráfica 1. Producción de energía del SIN (enero - abril 2011)



Fuente: Informe Estadístico CNEE 2012.

Figura 2. **Producción de energía del SIN (mayo-octubre 2011)**



Fuente: Informe Estadístico CNEE 2012.

A nivel latinoamericano, Guatemala posee uno de los costos más altos de energía eléctrica debido a la distribución de su matriz energética, por esta razón, los esfuerzos de las industrias guatemaltecas que manejan productos sólidos en partícula se centran continuamente en una reducción en los costos por utilización de energía. Sin embargo, actualmente no se trabaja en el área de almacenamiento de materiales en los silos. En 1997, la industria cementera en Guatemala, con la instalación de la línea de producción más reciente, decidió implementar en su proceso, silos que cumplieran una doble función, almacenamiento y homogeneización con menor consumo energético. Estos silos se instalaron con el sistema CP para su funcionamiento, obteniendo como resultado una operación estable en el material.

La situación actual exige cambiar la forma en que se produce y consume la energía para garantizar un desarrollo económico sustentable, al mismo tiempo que se satisfacen las necesidades energéticas por medio del uso racional de los recursos y las tecnologías.



## **2. Definición del problema**

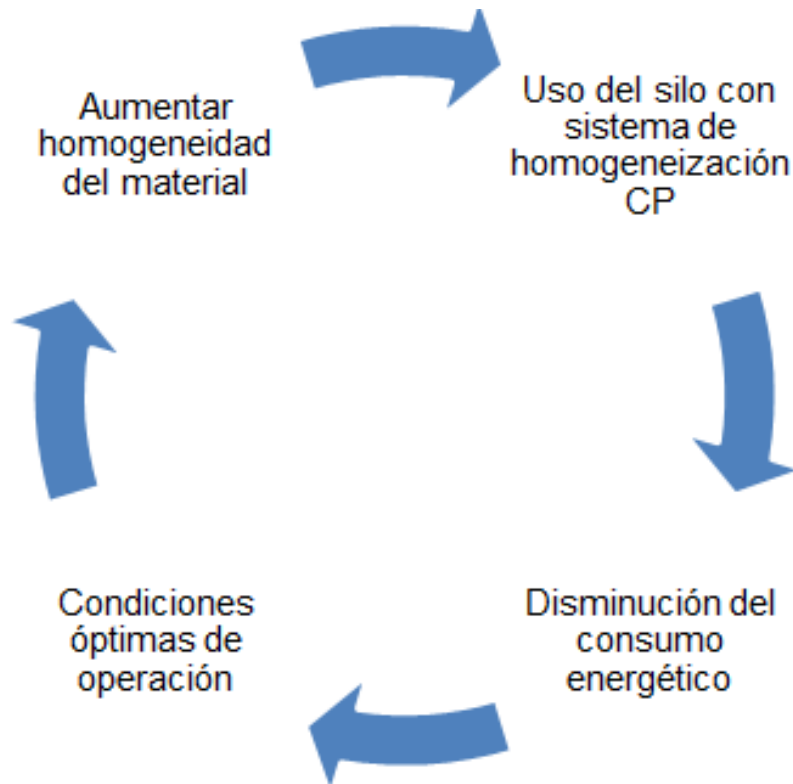
Existe actualmente en la industria cementera guatemalteca un sistema convencional de homogeneización, el cual es un sistema de silos para cumplir con la función de almacenaje y homogeneización de la harina cruda. Utiliza cuatro compresores de alta potencia para fluidificar el material desde la parte inferior del silo. Estos compresores demandan una gran cantidad de energía.

El sistema CP de homogeneización, utiliza compresores de menor potencia para fluidificar el material. Consta de ocho descargas del material dentro del silo, y cuatro áreas de aireación por medio de compresores. De las cuatro áreas, todas se mantienen en funcionamiento, pero una de ellas expulsa con mayor fuerza el aire, ésta es la llamada área de aireación activa. El área de aireación activa varía según sea el tiempo de aireación programado.

El sistema CP realiza su función consumiendo menor energía que el sistema convencional. Los silos con la metodología CP se utilizan para almacenamiento y homogeneización en el subproceso de harina cruda, pero el producto de salida no cumple en su totalidad con los requisitos de homogenización del material.

El problema es que no se ha hecho un análisis e investigación de las condiciones óptimas de operación de este nuevo sistema de homogeneización. Una vez encontradas se tendrá un material con mejor homogeneidad utilizando un sistema que consume menos energía. Al tener la respuesta a esta investigación, se podrá evaluar sustituir el almacenamiento en los silos convencionales por el almacenamiento en los silos CP.

Figura 3. **Cómo obtener condiciones óptimas de operación**



Fuente: elaboración propia.

Se trabajó durante el primer período del año 2012 en la planta cementera ubicada en el departamento del El Progreso.

En la industria cementera se tiene una búsqueda constante en materia de disminución del consumo energético para disminuir el costo del producto final.

En el proceso, la etapa de homogeneización de harina cruda es una de las indicadas para hacer esta reducción de consumo energético.

Existe un punto de mejora al emplear los silos de homogeneización que usan el método C-P. Si estos silos se operan normalmente, no generan un producto uniforme y existen variaciones en la harina cruda, lo que se traduce en variaciones en la calidad del cemento.

Como beneficios específicos se tendrá una reducción del consumo de energía eléctrica en planta, reducción del costo por consumo energético, producto uniforme, lo que se traduce en mejora de la de calidad del producto y una mejora en control del proceso. El beneficiario será la empresa productora de cemento al tener una disminución en la utilización de energía eléctrica, lo cual significa reducción de costos.

Es por estas razones que es necesario encontrar las condiciones óptimas de operación de estos silos para que provean de harina cruda homogénea y con la calidad requerida en un orden igual o mayor a los silos con el método convencional que se utilizan actualmente. Sabiendo así que se maximiza la utilización de la energía al emplear los silos CP para almacenamiento y homogeneización.

### **Preguntas de investigación**

- ¿Cuáles son las condiciones óptimas de operación en el sistema de homogeneización CP para disminuir el consumo energético de una industria cementera?
- ¿Cuánta energía se disminuye al usar el sistema CP en lugar del sistema convencional?

- ¿Cuánto es el costo disminuido en el consumo energético al utilizar el sistema CP en lugar del sistema convencional?
- ¿Cómo aumentar la homogeneidad del producto en la descarga de harina cruda?



## 3. Marco Teórico

### 3.1. Proceso de fabricación de cemento

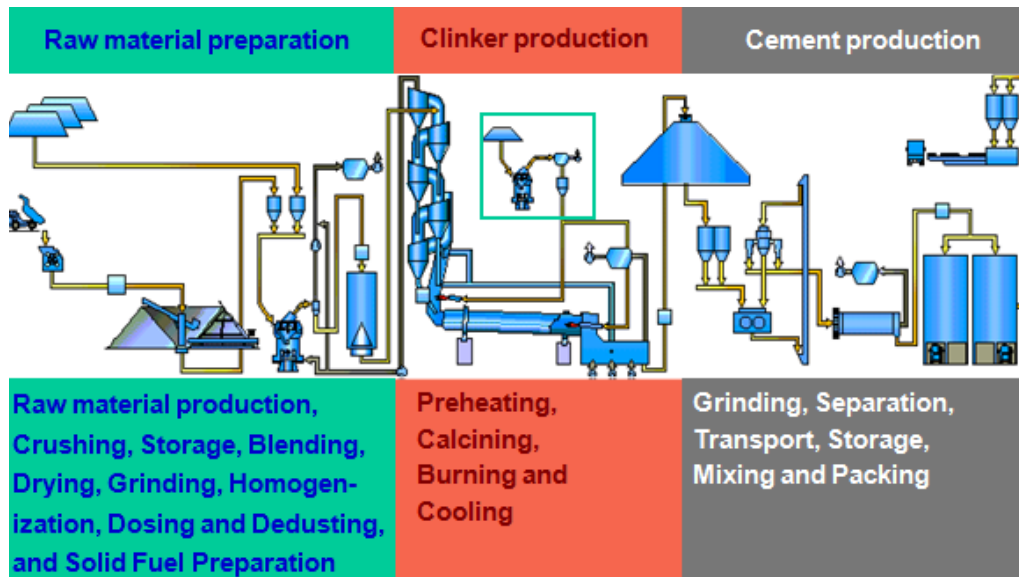
El cemento es un aglutinante hidráulico, un material inorgánico finamente molido que, cuando se mezcla con agua, forma una pasta que se endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación, después de haber endurecido, mantiene su fuerza y estabilidad incluso bajo el agua (Labahn, 1985).

#### 3.1.1. Operaciones básica en la fabricación del cemento

Las operaciones básicas a considerar en la fabricación del cemento son las siguientes de acuerdo a la figura 4:

- Preparación de la materia prima (*Raw material preparation*), que incluye la producción de la misma, trituración, almacenamiento, prehomogenización, secado, molienda, homogenización, dosificación y desempolvo, y preparación de combustible sólido.
- Producción de Clinker (*Clinker production*): incluye precalentamiento en la torre de ciclones, calcinación y enfriamiento.
- Producción de cemento (*Cement Production*): incluye molienda, separación, transporte, almacenaje y envasado.

Figura 4. Operaciones básicas en la fabricación de cemento



Fuente: FUNCTIONING AND PROCESS ENGINEERING DESIGN OF LARGE SILOS.  
<http://bogobooks.com/functioning-and-process-engineering-design-of-large-aerated-silos.html>.

### 3.1.1.1. Preparación de materia prima

Para una mejor comprensión de las técnicas del ahorro de energía, a continuación se describen las principales características de cada una de las operaciones básicas que consumen de energía.

Figura 5. **Preparación de la materia prima**



Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Martin Rothfuchs. HGRS/ Mechanical Process Technology Course. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

### 3.1.1.2. **Extracción y trituración**

En la labor de extracción se utilizan actualmente máquinas perforadoras de gran rendimiento que realizan su trabajo apoyadas por grandes voladuras con barrenos desde la superficie.

Dada la variedad y diferente grado de complejidad que presentan los distintos yacimientos, es difícil sacar conclusiones prácticas sobre los métodos de explotación idóneos que permitan un menor consumo de energía y de explosivos en esta fase del proceso (Gomá, 1979).

Existe una gran variedad de máquinas para efectuar la trituración, dependiendo la elección de las propiedades de la materia prima, principalmente de su dureza, humedad y grado de abrasión (normalmente marcado por el contenido de sílice libre).

El grado de avance a alcanzar en la trituración viene marcado por un equilibrio entre los costos por abrasión de la máquina y la consiguiente disminución de los costos energéticos en la posterior molienda (Gomá, 1979).

Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas, se transportan a la planta en camiones o bandas.

El material de la cantera es fragmentado en las trituradoras, cuya tolva recibe la materia prima, que por efecto de impacto o presión son reducidos a un tamaño máximo de una o media pulgada.

#### **3.1.1.3. Dosificación y Pre-homogenización**

Es la mezcla proporcional de los diferentes tipos de arcilla, caliza o cualquier otro material que lo requiera. Se procede a la dosificación de los componentes, (algunos de los elementos de ajuste puede adicionarse posteriormente).

#### **3.1.1.4. Secado y molienda de materia prima**

La humedad del crudo impone limitaciones técnicas en la molienda y es por ello necesario un secado previo de la harina cruda.

El secado necesita gases que pueden tener diversas procedencias. Generalmente los gases de escape del horno realizan el secado, en su totalidad, o bien apoyados por gases procedentes de un hogar auxiliar cuando la humedad del crudo lo hace necesario.

Se realiza también por medio de molinos, que muelen el material mediante la presión que ejercen rodillos cónicos al rodar sobre una mesa giratoria de molienda. Se utilizan también para esta fase, molinos horizontales, en cuyo interior el material es pulverizado por medio de bolas de acero (Gomá, 1979).

### 3.1.1.5. Homogeneización de harina cruda

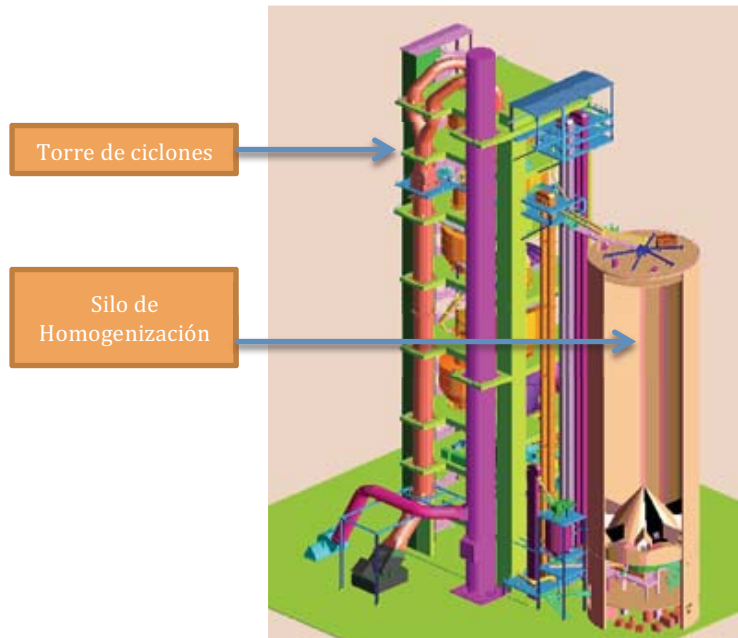
Se realiza en los silos equipados para lograr una mezcla homogénea del material. Dado que las materias primas utilizadas para la fabricación del Clinker de cemento deben cumplir unas especificaciones definidas, antes de proceder a su cocción es necesario realizar un ajuste definitivo. Esta operación se conoce con el nombre de homogeneización (Rothfuchs M. , 2011). Para obtener una buena calidad de alimentación en el horno, se deben considerar los aspectos mencionados en la Figura 6, de los cuales la homogeneización juega un papel fundamental en la estabilidad de la producción de Clinker.

Figura 6. Factores que afectan la calidad de alimentación al horno



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Silo de homogenización**



Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Martin Rothfuchs. HGRS/ Mechanical Process Technology Course. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

En esta fase del proceso se determina la composición elemental del crudo resultante y se establecen relaciones numéricas entre los componentes químicos más importantes resultando una serie de módulos (Lección 17: Homogenización del crudo, instalaciones de homogenización).

De la eficiencia de la homogenización depende en buena medida la marcha regular del horno, teniendo por consiguiente una gran incidencia en el consumo energético de la planta.

Figura 8. **Proceso de homogenización**

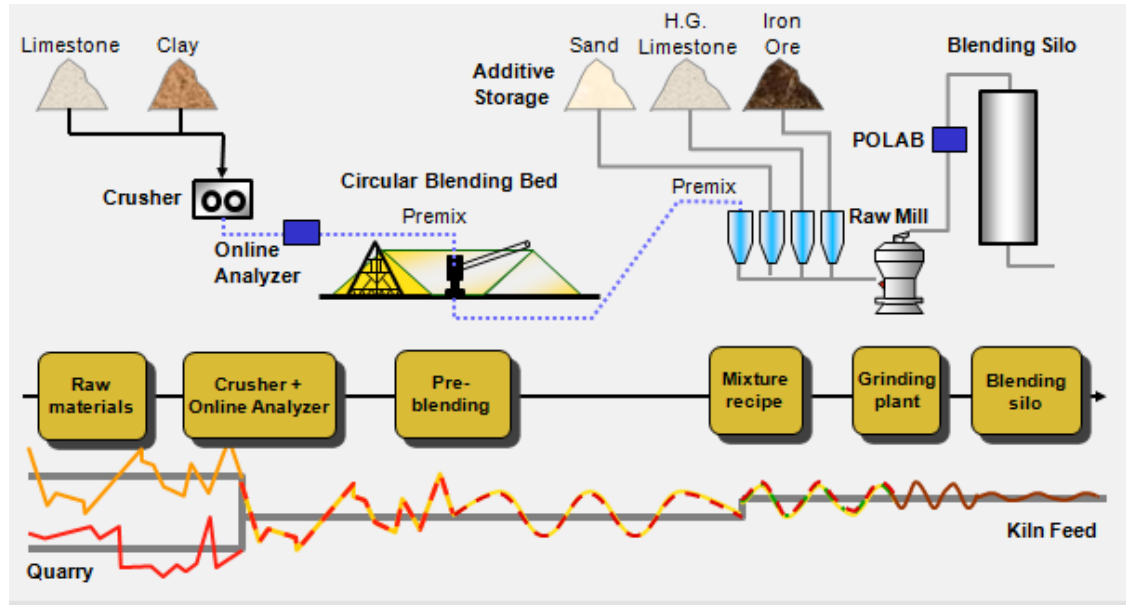


Diagrama: materia prima, trituradora y analizador en línea, pre-homogenización, mezcla (harina cruda), molienda y silo de homogenización.

Fuente: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO. Disponible en Web: [www.ieca.es/fabcimento.php](http://www.ieca.es/fabcimento.php). 5 de agosto de 2013.

Tabla I. **Requerimientos de la preparación de harina cruda**

<b>Fineza en alimentación</b>	12-15 (20)% de residuo en 90 micrones
<b>Contenido de humedad</b>	1%

Fuente: SURVEY ON HOMOGENIZING AND BLENDING SILOS AND THEIR OPERATION. Martin Rothfuchs. HGRS/ Mechanical Process Technology Course. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

### 3.1.1.6. Producción de Clinker

Esta operación incluye los procesos comprendidos desde la alimentación del crudo hasta la salida del Clínter del enfriador. el crudo (harina) a su salida de homogenización pasa a los sistemas de alimentación y de este a un precalentador constituido al menos por una etapa de ciclones.

Los procesos físico-químicos por los que atraviesa el crudo a medida que se va calentando son los siguientes:

El crudo sufre unos procesos físico-químicos a medida que va calentándose:

- Secado hasta una temperatura próxima a los 150°C
- Eliminación del agua de constitución de la arcilla hasta los 500°C
- Descarbonatación desde 850°C hasta unos 1,100°C
- Clinkerización entre 1,250 y 1,475°C

En general las reacciones que se producen hasta la obtención del Clínter son de carácter fuertemente endotérmico consumiéndose entre 1,590 y 1,840 kJ/kg de Clínter.

La serie de reacciones que se verifican a partir de los 550°C es muy compleja. De todas ellas la más importante es la formación del silicato tricálcico ( $C_3S$ ) y este producto sólo es estable a temperaturas superiores a los 1250°C; ésta sería la mínima temperatura requerida para la cocción del clínter. Sin embargo, en la práctica se trabaja entre los 1400 y 1500°C para que la formación de  $C_3S$  sea más rápida. Por encima de los 1280°C se forma una fase líquida que favorece la reacción y facilita el desarrollo de la costra protectora del refractario del horno. No obstante, un crecimiento desmesurado de la fase



líquida implica una mayor resistencia del Clínter en su posterior molturación.  
(Proceso de Fabricación del cemento)

Desde el punto de vista energético interesa que la temperatura de clínterización sea lo más baja posible y que la reacción anterior se verifique en el mínimo tiempo.

La temperatura puede rebajarse a base de una molienda especialmente fina y con una mezcla muy homogénea de los diversos componentes. Existe para cada crudo un límite económico entre el mayor consumo eléctrico en su molienda y la disminución del consumo térmico para su sinterización.

Se puede favorecer la cocción del Clínter añadiendo fundentes y mineralizadores. Los fundentes rebajan la temperatura mínima necesaria para la formación de la fase líquida, disminuyendo la viscosidad de la misma y acelerando las reacciones (Labahn, 1985).

Los mineralizadores favorecen asimismo la reacción entre el  $C_2S$  y el  $CaO$  libre, incluso en ausencia de fusión. No obstante, las experiencias conocidas indican que solamente en el caso de crudos con alto contenido en cal parece económico el uso de estos aditivos (Schafer, 2011).

Rebasada la fase de sinterización es necesario proceder a un enfriamiento del clínter. Las experiencias antiguas decían que solo es posible conseguir una elevada resistencia en el cemento cuando el clínter se enfría rápidamente. Esta exigencia quedaba bien satisfecha con el uso de enfriadores de parrilla, a base de elevados volúmenes de aire.

Se ha demostrado que el enfriamiento más lento del Clínter, como el que se realiza en los enfriadores tipo satélites, no repercute negativamente en la fabricación del cemento. No obstante, debe evitarse un enfriamiento demasiado

largo, pues puede provocar un fraguado muy lento, difícil de corregir con una adición de yeso (Worrell, 2004).

En el caso de que el Clínter se utilice para la fabricación del cemento blanco, es necesario someterlo a un enfriamiento brusco a la salida del horno (normalmente con agua) para que conserve la tonalidad deseada. Posteriormente se procede a un secado del clínter (consumiéndose combustible en esta fase del proceso), por lo que en conjunto estos tipos de productos requieren unos aportes térmicos mayores, que puede llegar a ser un 10% del total consumido en la instalación.

La industria del cemento se caracteriza por el considerable consumo energético que su producción conlleva, y de ahí el interés en la minimización de dicho consumo.

En la operación de los procesos de clínterización y molienda, propios de la industria cementera, usualmente las variables críticas oscilan o tienden a oscilar más de lo deseable y la actuación continua o intermitente del operador es generalmente requerida para guiar el funcionamiento del proceso. En consecuencia, estos procesos no suelen funcionar de forma absolutamente continua, regular y estable, ni tampoco en su punto de rendimiento máximo.

#### **3.1.1.7. Molienda de cemento**

El Clínter a su salida del enfriador es enviado a los correspondientes silos, de donde es extraído y mezclado con el yeso y las restantes adiciones, en la calidad y proporciones adecuadas al cemento que se desea fabricar. La mezcla dosificada de componentes es molida hasta la granulometría necesaria. Usualmente, no son requeridos en esta fase del proceso aportes de energía

térmica ya que el propio calor residual del clínquer y el desarrollo por fricción son suficientes para eliminar la humedad de las adiciones (Labahn, 1985).

Hay que destacar que el consumo eléctrico de la molienda es muy importante pudiendo llegar como media al 40% de la energía eléctrica suministrada a la planta.

La molienda se puede efectuar por:

- Circuito abierto: la premolienda y el refinado se efectúan en un solo molino, normalmente dividido en dos cámaras, estando la última dotada de un clasificador de bolas (Gomá, 1979).

Las dificultades de este sistema son, la disipación del calor latente del clínquer y de molturación, lo que requiere una fuerte ventilación del molino e incluso la inyección de agua, y la dificultad del cambio rápido a otras finuras distintas a la prefijada.

- Circuito cerrado: la instalación va dotada de un separador, siendo la disposición del conjunto similar a la de molienda de crudo. El separador hace posible la regulación de finura dentro de ciertos límites. Los molinos suelen ser de dos cámaras: al igual que en el caso anterior es necesario eliminar una gran cantidad de calor, aunque aquí se vea favorecido este hecho por la posibilidad de utilizar mayores caudales de aire, pero puede seguir siendo necesaria una inyección de agua. Normalmente se emplea el circuito cerrado puro, no el doble rotatorio ya que no se observan ventajas apreciables en el segundo sistema y tiene en contra un mayor costo de instalación.

Salvo en lo referente al aprovechamiento de los gases no existen diferencias esenciales entre los sistemas de molturación del crudo y del clínquer. Aquí esta más acentuada la utilización de molienda en circuito cerrado, por las mayores exigencias de la granulometría del cemento.

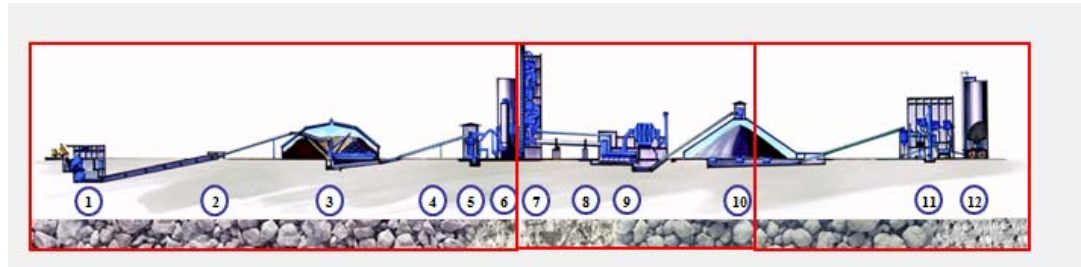
En la industria de cemento, los procesos de molienda presentan un elevado ahorro potencial, habiéndose resistido no obstante su regulación a las metodologías de control tradicionales. Alrededor del 75% del total de la energía eléctrica invertida en la producción del cemento corresponde a la molienda de las materias primas y del cemento (Cement International).

#### **3.1.1.8. Envasado y despacho**

El cemento es enviado a los silos de almacenamiento; de los que se extrae por sistemas neumáticos o mecánicos, siendo transportado a donde será envasado en sacos de papel, o surtido directamente a granel. En ambos casos se despacha en camiones.

El proceso de fabricación del cemento se resume en la figura 9 a continuación:

Figura 9. **Proceso general de fabricación de cemento**



Partes de la figura:

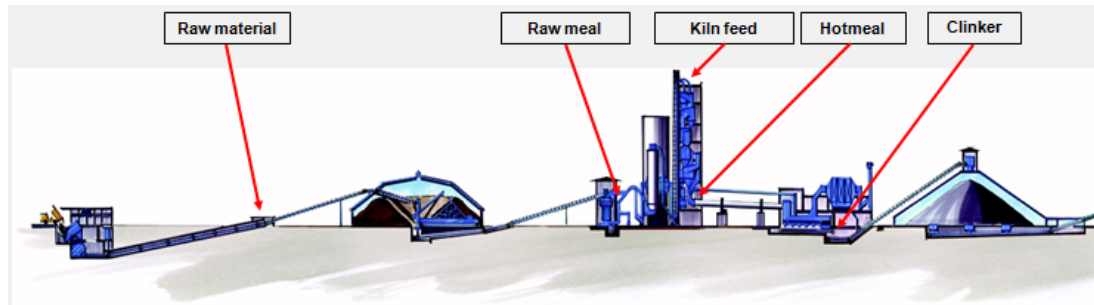
- Trituración
- Análisis de material (analizador de neutrones)
- Almacenamiento / Prehomogenización
- Transporte
- Molienda de harina cruda
- Homogenización
- Precalentamiento
- Calcinación
- Enfriamiento
- Almacenaje
- Molienda de cemento
- Almacenamiento, envasado y despacho

Fuente: <http://www.etsimo.uniovi.es>. 20 de septiembre de 2011.

### 3.1.2. **Química de la fabricación del cemento**

El cemento consiste en diferentes materiales que son estadísticamente homogéneos en composición según el aseguramiento de la calidad en el proceso de producción (Keece, 1997).

Figura 10. **Puntos de muestreo**



Partes de la figura:

- Materia prima
- Harina Cruda
- Alimentación del horno
- Harina caliente (harina cruda en el último ciclón, aproximadamente tomada a 800 ° C)
- Clinker

Fuente: <http://www.etsimo.uniovi.es>. 20 de septiembre de 2011.

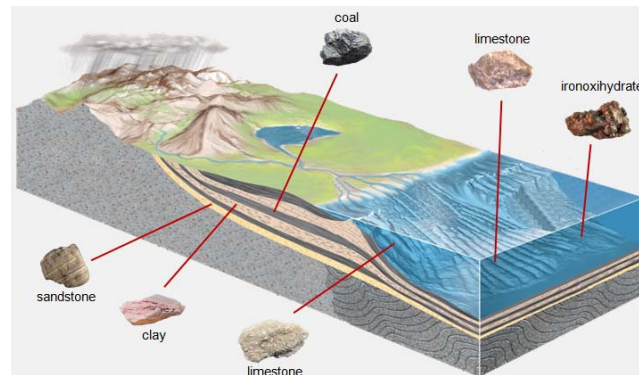
### 3.1.3. **Materias primas**

Para la fabricación de harina cruda se utilizan rocas sedimentarias las cuales son químicamente identificadas por un analizador de neutrones que trabaja en línea con la alimentación de materia prima triturada hacia la pila de homogenización.

- Caliza (limestone)
- Arcillas (*clay*)
- Rocas arenosa (*sandstone*)

- Materiales ferrosos (*ironoxide*)
- Carbón (coal)

Figura 11. **Rocas sedimentarias / materia prima**



Fuente: LABAHN, O. & Kohlhaas, B. Prontuario del Cemento. Barcelona: Editores técnicos asociados, p. 1885. 405.

### 3.1.4. Harina cruda

La harina cruda es un material finamente molido que da como resultado del proceso de molturación de la materia prima, es el material que se alimenta en la parte alta de los hornos de Clinker, cuya estabilidad química es indispensable para el buen rendimiento del proceso de clinkerización (Claudius Peters).

Los análisis químicos se realizan con ayuda de un equipo de laboratorio de difracción de rayos X, especialmente diseñado para la industria de cemento en el que se puede obtener la composición de cada material ingresado como muestra (Schafer, 2011).

La harina cruda se compone mayormente de:

- Óxido de calcio: en el analizador de rayos X se identifica directamente como cantidad de CaO, y también es calculado por el equipo como el Factor de Saturación de Calcio LSF (por sus siglas en inglés *Lime Saturation Factor*). Es la división de la cantidad actual de cal libre con la cantidad teórica de cal requerida por los otros óxidos mayoritarios en la mezcla de harina o Clinker. Es calculado de la siguiente manera:

$$LSF = \frac{100 (CaO)}{2.8 (SiO_2) + 1.18(Al_2O_3) + 0.65(Fe_2O_3)}$$

El rango típico en las plantas de cemento es de 92-98% en la entrada al horno.

- Óxido de sílice: En el análisis químico se presenta con la fórmula  $SiO_2$ , y es medido como el MS Módulo de Sílice. En el proceso representa la cantidad de fase líquida en la zona de fuego en el horno, cuando el MS es alto, la cantidad de fase líquida es baja y viceversa. Los valores típicos son de 2.3-2.7. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_3O_2}$$

Cuando el MS es muy alto, la formación de nódulos de Clinker y las reacciones químicas son muy lentas, haciendo difícil obtener un grado de reacción satisfactorio. El horno se vuelve polvoriento y difícil de operar. A mayor MS, mayor es la dificultad de quemabilidad. Cuando el MS es muy bajo habrá mucha fase líquida y el sobreforro en el horno se puede volver muy grueso.



- Óxido de aluminio: En el análisis químico se presenta como  $Al_2O_3$ . Se mide como el MA Módulo de Alúmina, y representa en el proceso la viscosidad de la fase líquida dentro del horno. La temperatura más baja se obtiene cuando el MA es aproximadamente 1.6 (óptimo en cuanto a formación de Clinker y nodulización). El MA también afecta el color del cemento, a mayor MA, menor color del mismo. Los valores típicos son de 1.0-2.5, se calcula de la siguiente manera:

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_3O_2}$$

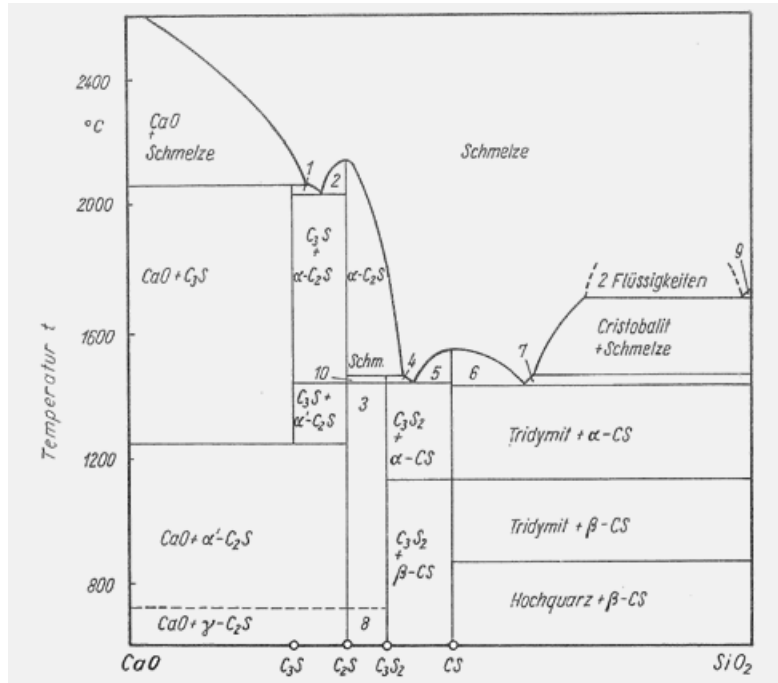
Tabla II. **Química de harina cruda**

<b>QUIMICA</b>	<b>Raw Mix [%]</b>
LOI ( <i>Loss on ignition</i> )	35.1
SiO <sub>2</sub>	14.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0
CaO	42.0
MgO	1.7
SO <sub>3</sub>	0.23
K <sub>2</sub> O	0.61
Na <sub>2</sub> O	0.22
TiO <sub>2</sub>	0.17
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06
Cl	0.01

Fuente: SURVEY ON HOMOGENIZING AND BLENDING SILOS AND THEIR OPERATION. Martin Rothfuchs. HGRS/ Mechanical Process Technology Course.

Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

Figura 12. Diagrama sólido-líquido óxido de calcio-óxido de sílice

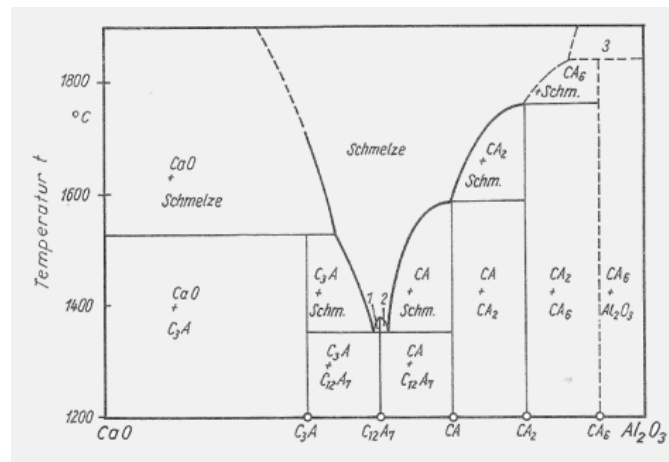


Fase líquida o fundida = *Schmelze*

Fluido = *Flüssigkeiten*

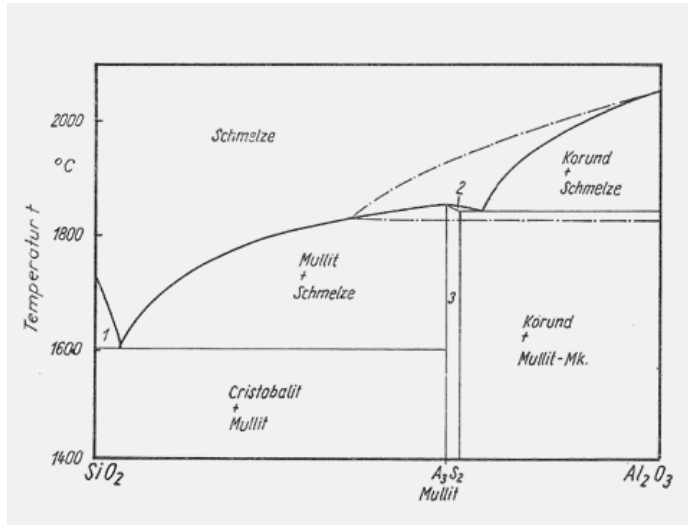
Fuente: KILN OPERATION AND OPTIMISATION COURSE, Basic principles of operation. F.L. Smith & Co. A/S. Manual de entrenamiento. Course P3 Module 1. Guatemala 1997.

Figura 13. Diagrama sólido-líquido óxido de calcio-óxido de aluminio



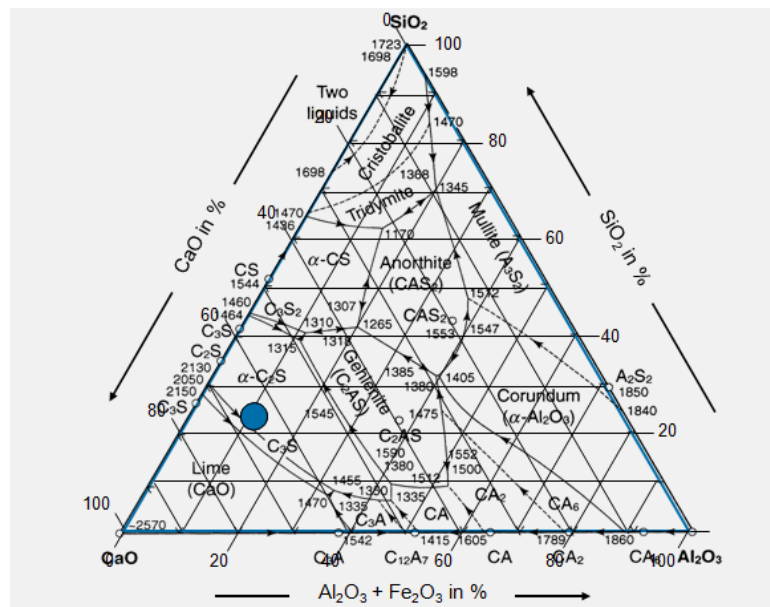
Fuente: KILN OPERATION AND OPTIMISATION COURSE, Basic principles of operation. F.L. Smith & Co. A/S. Manual de entrenamiento. Course P3 Module 1. Guatemala 1997.

Figura 14. Diagrama sólido-líquido óxido de sílice-óxido de aluminio



Fuente: KILN OPERATION AND OPTIMISATION COURSE, Basic principles of operation. F.L. Smith & Co. A/S. Manual de entrenamiento. Course P3 Module 1. Guatemala 1997.

Figura 15. Diagrama sólido-líquido óxido de calcio-óxido de aluminio-óxido de sílice



Fuente: KILN OPERATION AND OPTIMISATION COURSE, Basic principles of operation. F.L. Smith & Co. A/S. Manual de entrenamiento. Course P3 Module 1. Guatemala 1997.

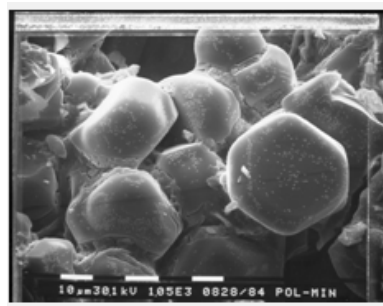
### 3.1.5. Componentes del Clinker

El Clinker de cemento es un aglomerante grueso de materiales sintéticos, producido por medio de la quema de harina cruda, que consiste en una mezcla selecta de materias primas. (Worrel, 2000)

Los principales componentes del Clinker son

- Alita:  $C_3S$  (50-65%), se endurece más rápido que la belita, y es el componente que contribuye a las resistencias tempranas aún así, su alto contenido aumenta las resistencias en todas las etapas. Tiene un alto valor de hidratación 500 kJ/kg). Resiste ataques de sulfuro.

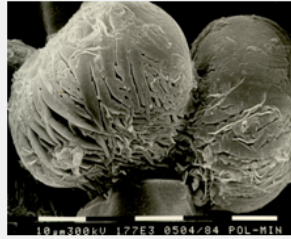
Figura 16. **Alita**



Fuente: BASIC CEMENT CHEMISTRY. Cement Manufacturing Course – Spring 2011.  
Elke Schafer, HGRS/CMS – Materials Technology. Holcim Group Support Ltd 2011.  
Suiza 2011.

- Belita  $C_2S$  (10-30%), endurece lentamente y contribuye al desarrollo de las resistencias tardías. Resiste ataques de sulfuro y tiene un bajo calor de hidratación (250 kJ/kg).

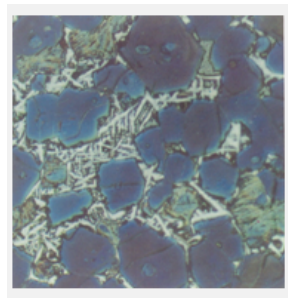
Figura 17. **Belita**



Fuente: BASIC CEMENT CHEMISTRY. Cement Manufacturing Course – Spring 2011.  
Elke Schafer, HGRS/CMS – Materials Technology. Holcim Group Support Ltd 2011.  
Suiza 2011.

- Aluminato de calcio  $C_3A$  (4-10%) Se forma rápidamente, contribuye a la resistencia temprana y mínimamente a la resistencia final. Tiene un alto calor de hidratación (900 kJ/kg), liberando una gran cantidad de calor durante los primeros días de endurecimiento. Cementos con bajo aluminato de calcio, son resistentes a suelos y aguas con sulfatos. Concentraciones mayores pueden reaccionar con sulfatos, causando expansión y formación de fisuras, exponiendo a mayor penetración de sulfatos en la estructura.

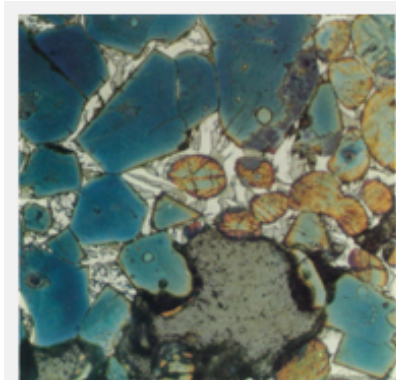
Figura 18. **Aluminato de calcio**



Fuente: BASIC CEMENT CHEMISTRY. Cement Manufacturing Course – Spring 2011.  
Elke Schafer, HGRS/CMS – Materials Technology. Holcim Group Support Ltd 2011.  
Suiza 2011.

- Aluminoferrato cálcico:  $C_4AF$  (2-10%), tiene un efecto mínimo en la resistencia del cemento, contribuye solamente a la resistencia final. Da un color oscuro al cemento y se evita cuando se fabrica cemento blanco.

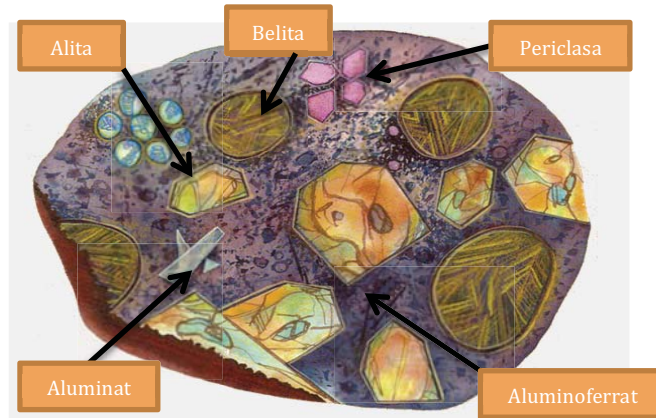
Figura 19. **Aluminoferrato de calcio**



Fuente: BASIC CEMENT CHEMISTRY. Cement Manufacturing Course – Spring 2011.  
Elke Schafer, HGRS/CMS – Materials Technology. Holcim Group Support Ltd 2011.  
Suiza 2011.

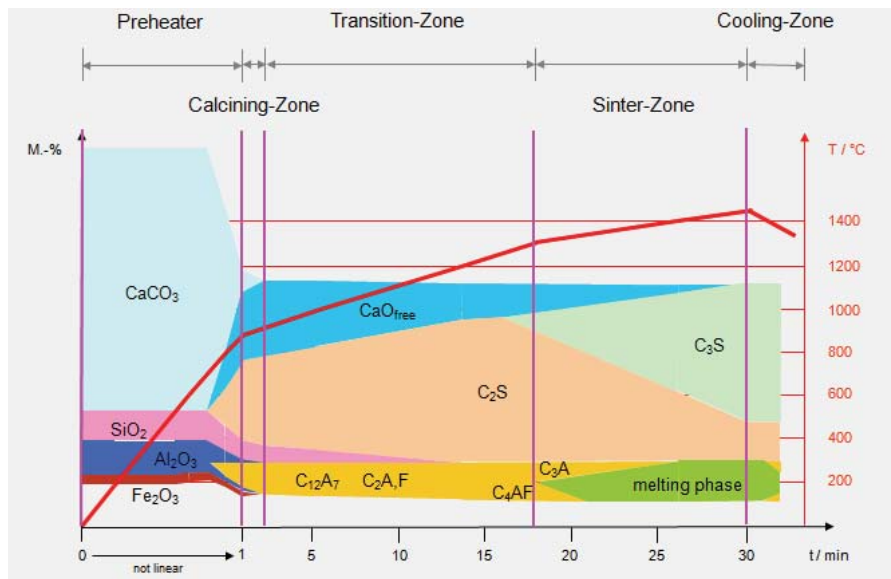
- Cal libre u óxido de calcio  $CaO$ : Para monitorear el proceso de clinkerización se analiza la cantidad de  $CaO$  libre sin reaccionar en el Clinker, a menor cantidad de cal libre, mayor completación en las reacciones. Sin embargo un dato de Cal libre muy baja, puede indicar un proceso poco económico. El objetivo es un dato de Cal libre de 0.5 – 1.5 %, en teoría, el proceso puede ser quemado con 0% de cal libre. Cuando se usa en el horno, carbón u otros combustibles que contengan ceniza, el LSF de la harina puede ser mayor a 100%. La incorporación de ceniza en el Clinker, disminuye el LSF debido a la sílica, alúmina y hierro contenido en la misma.
- Periclasa u óxido de magnesio  $MgO$ , no tiene ninguna contribución a resistencias, simplemente consume calor en el proceso.

Figura 20. **Clinker**



Fuente: BASIC CEMENT CHEMISTRY. Cement Manufacturing Course – Spring 2011.  
Holcim Group Support Ltd 2011. Suiza 2011.

Figura 21. **Diagrama Temperatura-Tiempo de formación de Clinker**



- Precalentamiento (*Preheater*)
- Zona de transición (*Transition Zone*)

Continuación de la figura 21:

- Zona de enfriamiento (*Cooling zone*)
- Fase líquida (*melting phase*)

Fuente: BASIC CEMENT CHEMISTRY. Cement Manufacturing Course – Spring 2011.  
Holcim Group Support Ltd 2011. Suiza 2011.

### 3.1.6. Reacciones en la formación de Clinker

- Secado: 20-200 °C
- Eliminación de agua adsorbida o superficial: 200-450 °C
- Descomposición de arcillas y formación de metakaolinita: 450-600 °C
- Descomposición de metakaolinita: 600-950 °C
- Descomposición de caliza y formación de CS o CA: 800-1000 °C
- Formación de minerales de Clinker: 1000-1300 °C
- Formación de  $C_3S$ : 1300-1450 °C

Figura 22. Reacciones químicas en la formación de Clinker

Process	Chemical reaction
Drying	$H_2O \uparrow$
Elimination of adsorbed water	$H_2O \uparrow$
Decomposition of clay, formation of metakaolinit	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
Decomposition of metakaolinit	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$
Decomposition of limestone formation of CS u. CA	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ $3CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
Formation of clinker minerals	$CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
Formation of $C_3S$	$2CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$

Fuente: BASIC CEMENT CHEMISTRY. Cement Manufacturing Course – Spring 2011.  
Holcim Group Support Ltd 2011. Suiza 2011.



### 3.2. Silos

Un silo es una estructura diseñada para almacenar grano y otros materiales a granel. Los más habituales tienen forma cilíndrica, asemejándose a una torre, construida de madera, hormigón armado o metal (Mezclado de Sólidos).

El diseño, inventado por Franklin Hiram King, emplea por lo general un aparejo mecánico para la carga y descarga desde la parte superior (Claudius Peters).

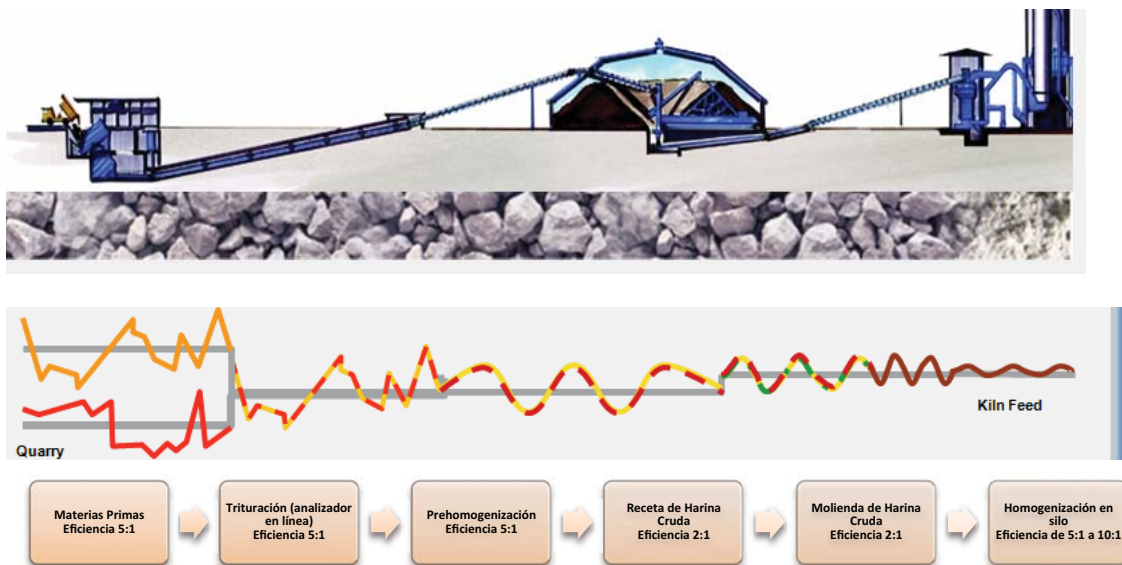
No existe una industria en la que no haya alguna forma de recipiente utilizado para almacenar distribuir los materiales a granel. Su estructura simple y aparentemente funcionamiento sencillo significa que llegan a ser considerados como un elemento poco importante en un proceso de nivel superior y que se presta poco cuidado en su diseño. Las consecuencias son fallas de operación y paros, flujo descontrolado e irregular de la mayor parte del material, la calidad del producto resultante de la fluctuación de la segregación.

Silos grandes con volúmenes de almacenamiento de varias decenas de miles de metros cúbicos son necesarios, especialmente en industrias en las que se producen o transforman materiales de grano fino a granel. Los productos típicos son: harina cruda de cemento, cemento, alúmina, cenizas volantes, caliza, entre otros. En la industria cementera, existen dos modalidades para la homogenización en silos, el silo tangencial y el *multipack* (Silo Technology).

### 3.2.1. Silo de homogenización

La homogenización es un proceso físico que consiste en sustituir un material fuertemente heterogéneo por uno homogéneo equivalente. Precisamente, los silos de homogenización realizan la tarea de uniformizar en la mayor medida, la composición del material que se trabaja. En este caso los silos de homogenización son el paso previo a la alimentación del horno (Lección 17: Homogenización del crudo, instalaciones de homogenización).

Figura 23. **Resultados finales de la homogeneidad de materia prima, desde las materias primas, equipos automatizados y equipos**



Fuente: SURVEY ON HOMOGENIZING AND BLENDING SILOS AND THEIR OPERATION.

Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

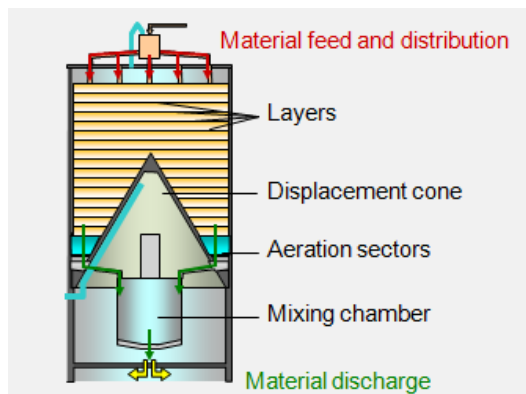
Como se mencionó anteriormente en cuanto a consumo energético, interesa que la reacción de clinkerización tenga lugar a la menor temperatura posible y que sea una reacción rápida. La temperatura puede reducirse aportando una mezcla muy fina y homogénea en el ingreso del horno. Además se requiere una mezcla homogénea para poder controlar de una mejor manera

el proceso de clinkerización en cuanto a las principales variables: cantidad de combustible, toneladas de harina cruda, velocidad de rotación del horno, etc.

Partes de un silo de homogenización:

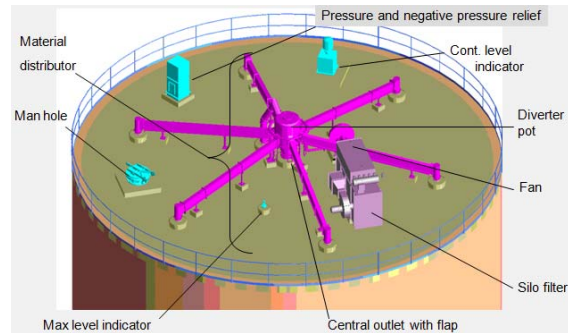
- Sistema de alimentación del silo
- Capas de material
- Cono de desplazamiento
- Sistema de alivio de presión: techos de alivio
- Sectores de aireación
- Cámara de mezclado
- Descarga de material

Figura 24. **Partes de un silo tangencial de homogenización**



Fuente: SILO TECHNOLOGY. [www.claudiuspeters.com/page/silo/101](http://www.claudiuspeters.com/page/silo/101)>. 5 de agosto de 2011.

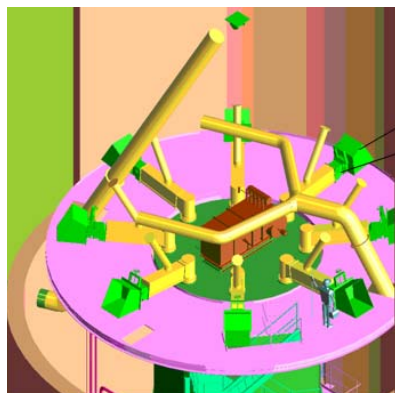
Figura 25. **Techo del silo y distribución de la alimentación de material**



Fuente: SILO TECHNOLOGY. [www.claudiuspeters.com/page/silo/101](http://www.claudiuspeters.com/page/silo/101)>. 5 de agosto de 2011.

Grandes silos con diámetros en el intervalo de  $10 \text{ m} \leq D_{\text{silos}} \leq 50 \text{ m}$  sólo se construyen con fondo plano y por lo tanto requieren una extracción adecuada para el vaciado completo. (Functioning and process engineering design of large silos). Se requiere una base de aireación, por lo general dividida en secciones, por un sistema de transporte que estén aireadas en la parte superior y estén inclinadas respecto a la horizontal en aproximadamente  $\alpha \cong 10^\circ$  hacia la salida del silo se ha convertido generalmente establecido. Estos silos generalmente proporcionan un cono de desplazamiento integral que, genera un perfil de flujo que mejora el trasiego de material a granel.

Figura 26. **Sistema de descarga**



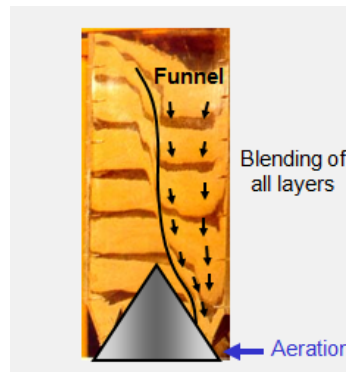
Fuente: SILO TECHNOLOGY. [www.claudiuspeters.com/page/silo/101](http://www.claudiuspeters.com/page/silo/101)>. 5 de agosto de 2011.

### 3.2.2. Forma de operación de un silo de homogenización

Características de la operación del silo:

- Operación continua (carga y descarga)
- Nivel interno de la cámara de mezclado constante
- Aireación y formación de embudos verticales
- Características del material

Figura 27. **Modo de operación del silo tangencial de homogenización**



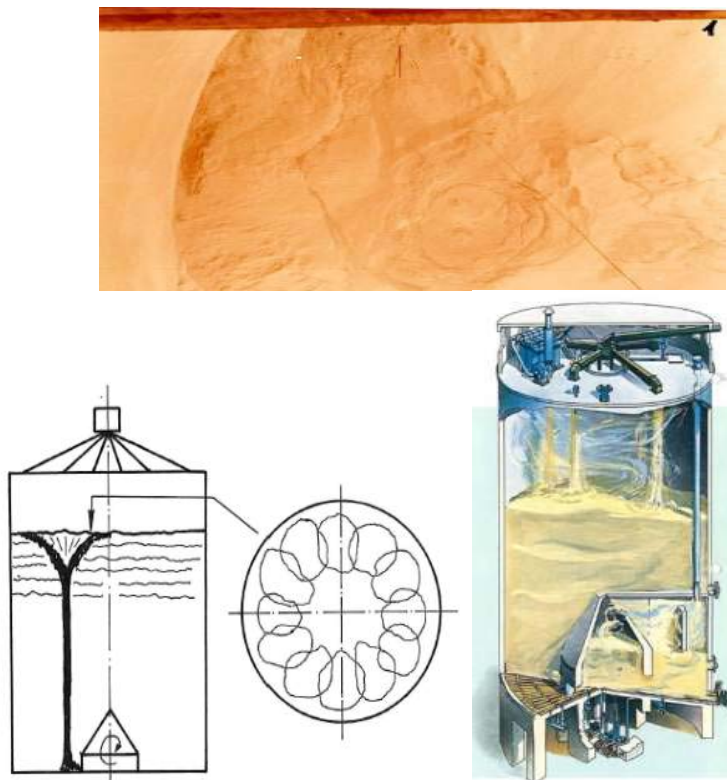
Fuente: SURVEY ON HOMOGENIZING AND BLENDING SILOS AND THEIR OPERATION. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

El modo de operación del sistema de extracción del silo se basa en la acción combinada del sistema de materiales a granel con la aireación que ayuda al proceso de extracción (Rothfuchs M. , 2011).

Al descargar el material en delgadas capas se crea un efecto de embudo al formarse las mismas y su mezcla, en el fondo se tiene una aireación permanente que permite fluidizar la mezcla y realizar el mezclado y homogenizado en el cono de desplazamiento y cámara de mezclado. El efecto

de mezcla depende directamente del número de capas. El perfil del flujo es inducido por el cono de desplazamiento integral y el alivio de la de la presión del producto que fluye hacia la salida por debajo del cono.

Figura 28. **Fluidez del material dentro del silo (entrada del material y formación de embudo)**



Fuente: SURVEY ON HOMOGENIZING AND BLENDING SILOS AND THEIR OPERATION. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

La base de aireación / silo se compone de regueras abiertas con una ligera caída hacia el centro del silo. Se divide en dos zonas que se airean independientemente una de otra. Una es el área del anillo exterior fuera del cono de desplazamiento que forma el espacio de almacenamiento real, y el área bajo el cono. Las regueras en el anillo exterior se extienden bajo el cono de desplazamiento. El agarre por fricción de material a granel cerca de la base,

se elimina por la aireación del anillo exterior. El material fluye radialmente en la dirección del desplazamiento del cono y la salida con ayuda del impulso de una columna recubierta del mismo junto con la presión de gas de aireación.

A las presiones habituales de aireación (soplador pS final de sobrepresión  $\cong 0,5$  bar menos las pérdidas en la línea y la base de la distribución) el material a granel por encima del anillo exterior no se fluidiza; el gas sólo fluye a través del material y lo afloja. El gas fluye más rápido en los sólidos por lo que proporciona propulsión adicional. Después que el material alcanza el cono de desplazamiento, se alivia la presión de la columna superpuesta de material en el espacio exterior y se forma completamente un lecho fluidizado. Este se comporta como un fluido. Su altura se mantiene a un nivel predeterminado por un sistema de control.

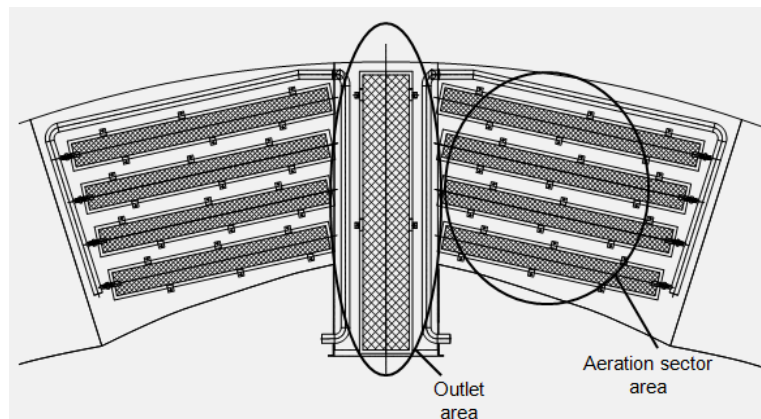
La presión constante del material y la descarga del mismo resulta en un flujo uniforme y fácilmente controlable. El cono de desplazamiento está ventilado por líneas de eliminación de polvo hacia la parte superior del silo o hacia la descarga sistema (Rothfuchs M. , 2011).

### **3.2.3. Sistema de aireación**

Tanto en el área de anillo exterior como el área debajo del cono de desplazamiento, la base está dividida en sectores que se airean como unidades en una secuencia predeterminada de tal manera que un canal de flujo totalmente aireado siempre se forma desde el interior de la pared silo a la salida central (Rothfuchs M. , 2011).

El material se fluidiza y comporta como si fuese un líquido, el principio se encuentra explicado en el anexo 1. Esto reduce el tamaño de flujo de gas de aireación, la cantidad de humedad que se introduce y el trabajo de compresión.

Figura 29. **Unidades de aireación**



Fuente: <http://www.sc.ehu.es>. 22 de abril de 2011.

La instalación de un cono invertido produce un espacio anular y por lo tanto, un perfil plano de flujo en una circular del silo (Rothfuchs M. , 2011). Sin embargo, este es un perfil de flujo asimétrico y el material a granel tiene que ser extraído de manera uniforme bajo el cono sobre toda la circunferencia del cono o sector activo.

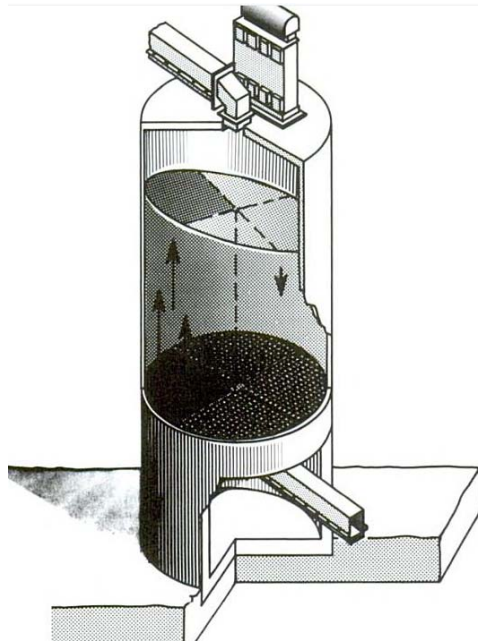
El número de sectores  $N_{sec}$ , es igual al valor numérico del diámetro del silo  $D_{sil}$ . La duración de la aireación de los sectores individuales  $\Delta T_s$ , en el anillo exterior también debe mantenerse corta, preferiblemente  $\Delta T_s < 5$  min, para limitar la expansión vertical del canal de flujo. Tiempos más largos pueden ser necesarios si el silo se utiliza como un silo de mezcla.



La secuencia de la aireación saltando entre los sectores individuales está diseñada de manera que un ciclo sobre todos los sectores anulares exteriores termina la partida en un sector y comienza de nuevo en ese mismo sector.

La base de silo formada como una tapa con dos o cuatro superficies, dependiendo del  $D_s$ , cubierto con transportes abiertos. Cada superficie tiene una base de la apertura en el radio exterior y se airea individualmente a su vez por un período predeterminado (Silo Technology).

Figura 30. **Silo, regiones de aireación**



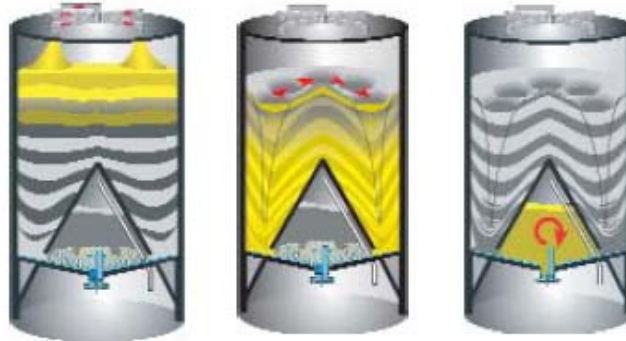
Fuente: <http://www.claudiuspeters.com>. 5 de agosto de 2011.

#### **3.2.4. Mezclado en silos**

El mezclado en los silos consta de tres etapas las cuales se mencionan a continuación:

- Alimentación múltiple: la materia prima se alimenta de manera uniforme sobre él toda la zona del silo a través de un distribuidor especial en el techo del silo, así se obtienen finas capas de materia prima. Principio: la capa más delgada, es la que mejor efecto de mezclado tiene (Mezclado de Sólidos).
- Mezcla por gravedad: en el espacio principal del silo, la materia prima se mueve en forma de embudo, el cual es producido por gravedad debido a la aireación inferior especial. Las diferentes capas se mezclan por el material de intercambio que permite que las variaciones a largo plazo sean compensadas. Un efecto adicional de mezclase logra mediante la mezcla de material diferentes embudos.
- Mezcla neumática: las secciones de mezcla pueden ser aireadas por separado. De esta manera, los segmentos pueden ser suministrados con cantidades de aire que no sólo fluidizan el material, sino también lo mezclan intensamente y garantizan una descarga de baja variación.

Figura 31. **Mezcla en silos**



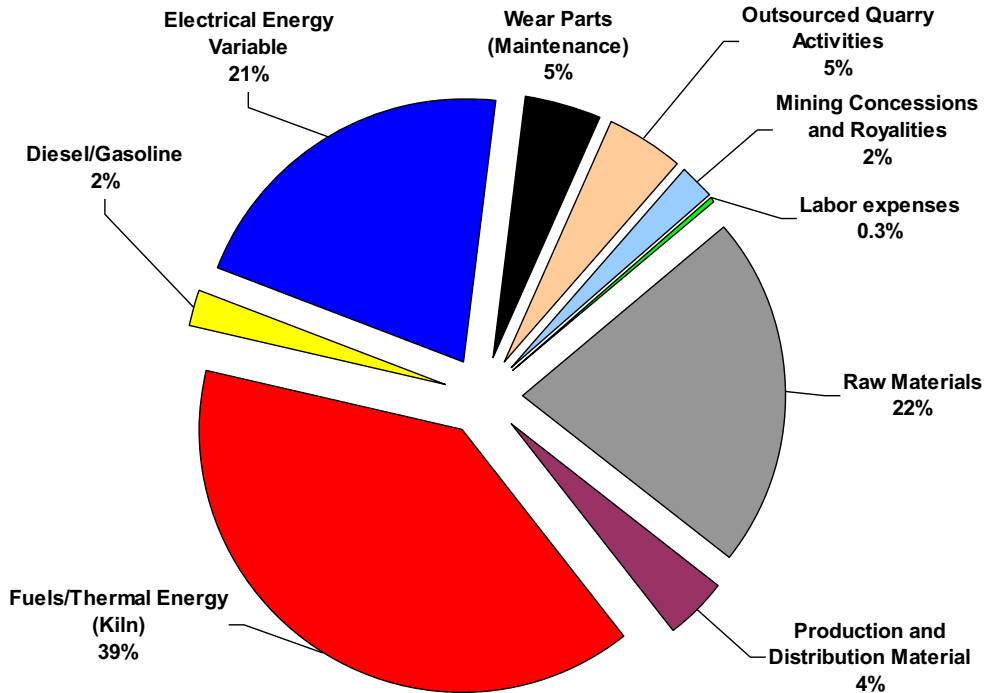
Fuente: <http://www.claudiuspeters.com>. 5 de agosto de 2011.

### **3.3. Consumos de energía en una industria de fabricación de cemento**

Los consumos de energía en las operaciones descritas, pueden separarse dependiendo de su naturaleza térmica o eléctrica. La energía térmica se consume prácticamente en su totalidad en el horno.

Según la figura 32, la energía eléctrica conforma el 21% de los costos en la industria del cemento, siendo así, junto a las materias primas (22% del costo), la segunda gran inversión para fabricar cemento.

Figura 32. Costos en una industria cementera



Fuente: DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO / RAMA CEMENTO. [www.energia.inf.cu/iee-mep/Document/Cemento.pdf](http://www.energia.inf.cu/iee-mep/Document/Cemento.pdf). 12 de octubre de 2013.

El consumo de electricidad unitario en la industria de cemento está determinado por varios factores, entre los cuales se incluyen el tipo de proceso usado para producir Clinker, el tipo de tecnología de protección ambiental, las edades combinadas del equipo industrial, el porcentaje de contenido de Clinker en el cemento, el grado de las operaciones y el tamaño de las plantas. En muchos países, el cambio a proceso seco y varios otros factores han llevado a aumentar el uso de la electricidad en la manufactura del cemento (Van Bethem, 2009).

En tanto que el proceso seco usa aproximadamente 30% menos de combustible por unidad de Clinker que el proceso húmedo, su consumo unitario de electricidad es más alto. El proceso seco tiene mayores requisitos eléctricos para el molido de la materia prima debido a los motores de secadores, ventiladores y equipo de control y porque el equipo de transporte y clasificación de proceso seco es menos eficiente (Martinez). En la producción de Clinker, el uso de electricidad es mayor con los procesos secos debido a que los ventiladores de succión que se usan para extraer el aire caliente del horno y llevarlo a través de los sistemas de control de emisión son mayores.

Tabla III. **Distribución de los consumos de energía eléctrica en una fábrica de cemento**

<b>PUNTO DE CONSUMO</b>	<b>% DE CONSUMO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA</b>
Preparación de las materias primas.	3,0%
Preparación y molienda del crudo.	32%
Homogenización y conjunto del horno.	21%
Molienda de cemento y acabado.	41%
Servicios generales y auxiliares.	2,0%
Iluminación.	1,0%

Fuente: Ahorro de energía en la industria del cemento

<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/cemento.pdf>. 12 de octubre de 2013.

Independientemente del proceso de fabricación adoptado y del tipo de combustible utilizado para la fabricación del Clinker, desde el punto de vista energético interesa considerar aquellas operaciones en las que se consume prácticamente la totalidad de la energía térmica y que son: secado, clinkerización y cocción.

Algunas operaciones presentan un consumo muy reducido en sí mismas respecto al consumo global de la instalación, pero tienen una incidencia notable en el consumo de otras operaciones, como ocurre con la homogenización del crudo para la alimentación al horno de cuya eficiencia depende la marcha regular del horno en buena parte.

### **3.3.1. Medidas de ahorro de energía**

La eficiencia energética se traduce en un uso eficiente de los recursos, acompañado de el mayor ahorro energético posible, esto significa que para una cantidad de producción se debe disminuir la mayor cantidad de energía y materias primas (Worrell, 2004).

El potencial de ahorro que se puede conseguir con cada medida depende de las características propias de cada industria: capacidad de producción (por motivos de escala), factor de carga (mientras más alejado esté del punto de producción nominal se darán menores rendimientos y mayores consumos específicos), combustible empleado, etc. (Worrell, 2004).

Aunque sea evidente, no está de más recordar que para considerar como recomendable una medida de ahorro, no basta con que, efectivamente, haya un ahorro energético y sea tecnológicamente posible. Deben tenerse siempre en cuenta aspectos de calidad del producto y de garantías del mismo.

### **3.3.2. Ahorro de energía en las operaciones básicas de la industria del cemento**

Con este ahorro se tiene por objeto lograr en cada una de las operaciones básicas rebajar de una forma directa o indirecta los consumos de energía

térmica o eléctrica en aquellos puntos de las instalaciones en que sea posible adoptar medidas de ahorro de energía.

### **3.3.2.1. Ahorro de energía en las operaciones básicas de la industria del cemento**

Si se homogeniza más la materia prima al ser extraída, el costo energético de este se ve incrementado, pero al mismo tiempo, se disminuye el costo energético en la posterior fase de molienda, necesaria para conseguir que el horno trabaje de forma estable y por lo tanto más eficiente. Se hace necesario realizar un equilibrio entre la disminución del costo energético en la molienda y el costo de abrasión de la maquinaria, normalmente de gran inversión (Schafer, 2011).

### **3.3.2.2. Secado y la molienda del crudo**

Debido al elevado consumo y los excedentes de gases en el proceso de fabricación de Clíinker, una primera mejora consiste en un acoplamiento entre los conductos de salida de gases del horno.

Con gases a 350°C a la salida de este sistema y con baja proporción de aire falso, se puede llegar hasta un límite de 8% de humedad en el crudo. La limitación a este aprovechamiento es el clima seco.

### **3.3.2.3. Mejoras en el precalentamiento de la carga**

En los procesos de vía semiseca y semihúmeda, en instalaciones que disponen de parrilla con simple paso de gases se instala en su renovación la

parrilla con doble circulación de gases. Se debe establecer un óptimo entre la profundidad del lecho de crudo en la parrilla y la circulación de gases a través de la misma (Centro de Estudios de la Energía).

En procesos de vía seca, en instalaciones con cuatro etapas de ciclones la temperatura de los gases de escape puede reducirse de la manera siguiente:

- Mejora en el diseño de los ciclones y conductos para aumentar su eficiencia térmica.
- Sustituir la etapa superior de ciclones o adicionar a continuación intercambiadores de calor en los que el crudo, manteniéndose en suspensión mediante una corriente recirculada de gases, pasa en sentido ascendente por el interior de unos tubos. Por otros tubos dispuestos en paralelo deben circular los gases en sentido descendente.
- Aumento del número de etapas de los intercambiadores.

Energéticamente interesa que la reacción de clinkerización tenga lugar a la menor temperatura posible y que sea una reacción rápida. La temperatura puede reducirse aportando una mezcla muy fina y homogénea (Worrell, 2004).

Esta medida producirá un mayor consumo energético en la molienda. Para reducir este consumo se emplean sustancias fundentes y mineralizantes. Con las sustancias fundentes, se rebaja la temperatura mínima necesaria para la formación de la fase líquida y se aceleran las reacciones, pero como inconveniente se produce un aumento de la viscosidad. Con los mineralizadores, se favorece la reacción con la cal libre incluso sin necesidad de fusión.



Las siguientes, permite obtener un ahorro cercano al 2.5% del combustible utilizado en el horno.

- Mejora en el aislamiento: se debe de mejorar el aislamiento térmico del horno, así como el de los principales equipos de la instalación que portan un fluido caliente. Es preciso tener en cuenta que un mayor espesor de revestimiento disminuye el volumen útil del horno y con ello su caudal; por otro lado el mayor espesor eleva la economía térmica del horno, puesto que rebaja las pérdidas por radiación (Dockrill P., 2001).
- Mejoras en el control del horno: para el caso de hornos de Clinker que son los más representativos y con mayores consumos. Esta medida se divide en la actualidad en tres grandes actuaciones:
  - Predicción online de cal libre
  - Procesador de imagen digital
  - Estabilizar la operación del horno
  - Una calidad constante del producto fluido
  - Una reducción del consumo de combustibles primarios
  - El incremento en el uso de combustibles secundarios
  - El incremento en la disposición del horno
  - El incremento en la productividad
  - La reducción de emisiones
  - La reducción de los costos de mantenimiento y reparación, en el momento en el que el horno comienza a desestabilizarse, lo cual se indica por la variación en el contenido de cal libre el sistema avisa o actúa, permitiendo así que las propiedades del producto y las condiciones de generación en el horno sean muy constantes.

- Mejoras en el enfriamiento del Clinker
- Mejoras en los enfriadores de parrilla

Las mejoras en la recuperación de calor implican aumentar los enfriadores ya que un menor gradiente térmico supone una menor transmisión de calor. Un enfriamiento lento favorece el crecimiento de los minerales del Clinker, lo que debe de controlarse con el fin de no exigir un consumo eléctrico adicional en la posterior molienda.

Con este tipo de enfriador, se consiguen ahorros energéticos de 50 kcal/kg de Clinker en comparación de un enfriador satélite (Gomá, 1979). Adicionalmente, una de las principales ventajas de este tipo de enfriador es la fácil sustitución de las piezas dañadas, así como la facilidad para la limpieza del mismo, que permite reducir el número de limpiezas manuales por incrustaciones en la cámara y en el conducto ascendente al horno a una o dos intervenciones semanales, con el consiguiente ahorro energético al reducir las paradas en el proceso.

- Mejora en el enfriamiento mediante utilización de un lecho fluido: el enfriador de cuba vertical es un enfriador de lecho fluido, que aprovecha totalmente el aire como aire secundario. El lecho fluido se sitúa sobre unos rodillos a través de los cuales se pasa el Clinker hacia una salida inferior en la que se sitúa una trituradora. El Clinker sale a unos 200 ó 300 °C y el aire secundario sale a unos 900 - 1000 ° C (Worrell, 2004).

### **3.4. Aspectos ambientales**

La industria del cemento es la responsable del 10% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono, el gas clave en el calentamiento global (Aldrich, 2008).

La mayoría de las emisiones de dióxido de carbono durante la manufactura del cemento son causa de las altas temperaturas a las que debe ser sometido para poder acumular energía

La cocción de Clinker es la parte más importante del proceso en lo que respecta a los principales problemas medioambientales derivados de la fabricación de cemento: el consumo de energía y las emisiones atmosféricas. Los principales contaminantes que se emiten al medio ambiente son los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el polvo. Las técnicas de reducción de polvo llevan aplicándose más de 50 años y la reducción del  $\text{SO}_2$  es un problema específico de determinadas plantas, mientras que la reducción de  $\text{NO}_x$  es una cuestión relativamente nueva en la industria cementera.

Entre las medidas primarias generales tenemos: la optimización del control de procesos, el uso de modernos sistemas de alimentación gravimétrica de combustible sólido, la optimización de las conexiones de refrigeración y la aplicación de sistemas de gestión energética (Campos Avella). Estas medidas suelen tener por objeto mejorar la calidad del Clinker y reducir los costes de producción, pero también reducen el consumo de energía y las emisiones atmosféricas.

Las mejores técnicas disponibles para reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$  son una combinación de medidas primarias generales, medidas primarias

específicas para controlar este tipo de emisiones, sistemas de combustión escalonada y técnicas de reducción selectiva no catalítica.

Las mejores técnicas disponibles para reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> combinan las medidas primarias generales con la adición de absorbentes para obtener niveles iniciales no superiores a 1.200 mg de SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> y con depuradores de proceso húmedo o seco para obtener niveles iniciales superiores a éste. Los niveles de emisión asociados a la aplicación de estas técnicas se sitúan entre 200 y 400 mg de SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> (Los niveles de emisión se expresan en promedios diarios y en condiciones estándar de 273 K, 101,3 kPa, 10% de oxígeno y gas seco) (Aldrich, 2008).

Las emisiones de SO<sub>2</sub> que se generan en las fabricas de cemento vienen determinadas principalmente por la cantidad de azufre volátil que contienen las materias primas que se utilizan en los hornos. Si las materias primas contienen poca o ninguna cantidad de este elemento, los niveles de emisión de SO<sub>2</sub> serán muy inferiores al nivel citado sin necesidad de utilizar técnicas de reducción.

- Polvo de los hornos de cemento: El polvo de los hornos, principal subproducto de la manufactura de cemento, también constituye un impacto ambiental, pues esos residuos pueden producir contaminación en el aire y las aguas subterráneas y superficiales si no se tiene un control estricto.

### **3.5. Cambio climático**

Actualmente el mundo se enfrenta ante el reto de combatir el cambio climático, al mismo tiempo que persigue el crecimiento económico. De ahí, el papel fundamental que desempeña el sector energético en el desarrollo

económico y social de un país. Por lo tanto, resulta fundamental cambiar la forma en que el país produce y consume la energía para así garantizar un futuro más sustentable.

La eficiencia energética es el camino hacia esa transición energética; es la solución que permite el uso racional de la energía a la vez que se mantienen los niveles de competitividad.

El consumo adecuado y asequible de energía es indispensable para el desarrollo económico y social de un país. La situación actual exige cambiar la forma en que se produce y consume la energía para garantizar un desarrollo económico sustentable, al mismo tiempo que se satisfacen las necesidades energéticas por medio del uso racional de los recursos y las tecnologías.

La industria cementera, además de su importancia en términos de valor agregado, fue una de las actividades con mayor consumo de energía con una participación de 72.1% del consumo final energético de la industria de minerales no-metálicos en 2009 (AIE, OCDE y EUROSTAT, 2007). Durante los últimos años, la industria cementera ha sustituido insumos energéticos como el carbón, gas natural y combustóleo por coque de petróleo, principalmente por su menor costo. La intensidad energética del subsector fue 3.2 MJ por unidad física producida en 2009, con un descenso promedio anual de 1.2% de 1993 a 2009 (Aldrich, 2008).

El sector energético debe afrontar y mitigar los efectos del calentamiento global con las herramientas disponibles. Desde la perspectiva de la oferta energética, una solución a este reto es el impulso a las energías renovables y el desarrollo de tecnologías de baja emisión de carbono; mientras que por el lado

de la demanda, una respuesta es el uso eficiente de la energía. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2012)

La situación actual exige cambiar la forma en que se produce y consume la energía para garantizar un desarrollo económico sustentable, al mismo tiempo que se satisfacen las necesidades energéticas por medio del uso racional de los recursos y las tecnologías. A nivel mundial, el sector industrial se caracteriza por ser uno de los mayores motores del desarrollo económico y uno de los principales consumidores de recursos energéticos.

Según información de la AIE45, en 2008 el consumo final mundial de energía de la industria fue de 27.8%<sup>46</sup>, lo que lo convirtió en el sector con mayor consumo energético a nivel mundial y en uno de los mayores agentes generadores de emisiones de GEI. Por su parte, el sector primario a nivel mundial consumió 3.8% del consumo final total de energía en 2008 (Campos Avella).

## **4. Diseño Metodológico**

Las condiciones óptimas de operación en la homogeneización, disminuyen el consumo energético en la planta cementera.

### **4.1. Ubicación geográfica**

La experimentación se realizará en la planta cementera ubicada en El Progreso, en el silo No. 5 de homogeneización de harina cruda, que opera bajo el sistema CP.

### **4.2. Definición las variables dependientes en el proceso.**

- Consumo energético: cálculo de la energía empleada por los dos sistemas de homogeneización existentes.
- Disminución del costo por hora: cálculo de la diferencia de costo por energía eléctrica utilizada por los dos sistemas de homogeneización.
- Homogeneidad del material: cálculo del factor de homogeneidad (ratio de desviación estándar de LSF antes y después de que el material pasa por el silo).

### **4.3. Variables independientes cuantitativas (tratamientos experimentales)**

- Recirculación de material: se programará la salida de una parte del material por un canal alternativo para su reingreso al silo de homogeneización. Se comparará la variable independiente (factor de homogeneidad) con y sin recirculación.
- Secuencia de descarga del material: se establece por medio del departamento eléctrico dos distintas secuencias de descarga.
- Tiempo de aireación activa de los compresores: programar dos valores de tiempo de aireación en los compresores del silo CP:
  - 8 minutos
  - 3 minutos

### **4.4. Delimitación del campo de estudio**

De acuerdo a la definición del problema, en el caso de esta investigación, se establece un estudio correlacionar cuantitativo que se desarrolló de manera experimental. Este estudio generará relaciones y asociaciones entre una variable de interés y factores tratamiento. Por lo que se pondrán en práctica los factores tratamientos planteados para obtener una respuesta en el material de estudio. Las correlaciones que se realizarán serán entre las siguientes variables:



#### **4.4.1. Población**

El material transportado hacia los silos de homogeneización (harina cruda) es la población de estudio (definición en glosario y marco teórico, sección 3.1.4).

El silo de homogeneización No. 5 es el que contiene la población, el cual tiene una capacidad máxima de 80 pies lineales de altura, esto se traduce en 3200 toneladas de harina cruda.

Se define que para poder realizar el estudio, se requiere un 80% de llenado constante en el silo, es decir 2560 toneladas almacenadas o 64 pies de llenado en el silo.

#### **4.4.2. Muestra**

De acuerdo a la viabilidad del estudio y según las prácticas de muestreo del laboratorio de calidad de la empresa en donde se realiza la estimación de datos de homogeneidad, se tiene una muestra representativa del material programada cada hora, estas son obtenidas por medio del saca muestras automatizado en el punto de muestreo del silo. Cada muestra lleva 300 g de material.

#### 4.5. Recursos disponibles

Recursos establecidos en base a una duración del proyecto de 8 meses.

- Recursos Humanos

Investigador.....	\$ 1500.00
Analista químico.....	\$ 1000.00
Asesor.....	\$ 2000.00

- Recursos físicos

Laboratorio químico.....	\$ 250.00
--------------------------	-----------

- Materiales y suministros

Papel.....	\$ 10.00
Cartuchos para impresión .....	\$ 15.00
Fotocopias.....	\$ 3.75
Levantado de texto e impresión informe final .....	\$ 190.00
Energía eléctrica.....	\$ 50.00

- Pruebas y análisis

Instalación de reguera de recirculación.....	\$ 5,370.00
Análisis químico LSF.....	\$ 1,000.00

---

TOTAL.....\$ 11,390.00

## **4.6. Fases**

Las variables de interés costo y consumo energético necesitan tener validación en cuanto a la disminución de energía utilizada.

### **4.6.1. Fase I recopilación de datos: estimación de datos de energía**

- Colectar en campo las especificaciones de los sopladores y el número de los mismos utilizados en el sistema convencional de silos.
- Colectar en campo las especificaciones de los sopladores y el número de los mismos utilizados en el sistema CP.
- Realizar cálculo de energía utilizada por hora para ambos sistemas.

### **4.6.2. Fase II experimental: estimación de condiciones óptimas de operación en el sistema CP**

La comparación de las variables que se trabajan en esta fase son:

- Uso de recirculación vrs. Factor de homogenización
- Secuencia de descarga vrs. Factor de homogenización
- Tiempo de aireación vrs. Factor de homogenización

#### **4.6.2.1. Factor de homogenización**

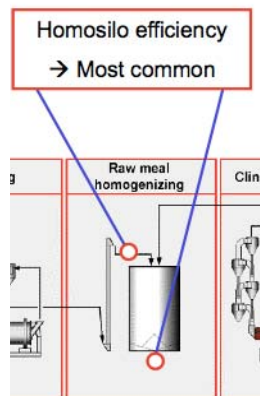
El principal control de la harina cruda es el factor de saturación, LSF, este se calcula según lo explicado en el marco teórico en la sección “química de la

harina cruda”. El rango típico en las plantas de cemento es de 92-98% en la entrada al horno (torre de ciclones). Se obtiene la desviación estándar del LSF con respecto a la meta, y este valor es el que reporta el laboratorio.

Para saber si el silo está haciendo su trabajo, se analizan las desviaciones estándar en dos puntos de muestreo:

- Entrada del silo, después de la molienda de harina cruda
- Salida del silo, antes de ingresar a la torre de ciclones del horno

Figura 33. **Muestreo para identificación de eficiencia del silo de homogenización**



Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

#### 4.6.2.2. Análisis de la muestra

Al material obtenido por medio del saca muestras automatizado se le realiza un proceso de análisis en el laboratorio:

- Llega al centro de análisis por medio de un sistema de tuberías neumáticas. Un robot prepara la muestra en pastillas de 2 g

- La pastilla con la muestra es ingresada al equipo difractor/difusor de rayos X el cual brinda la composición estructural de la muestra, así también la cantidad de cada elemento. Esto permite obtener el dato de LSF, representativo de la homogeneidad del producto.

#### 4.6.2.3. Factor de homogenización

La comparación entre el resultado de desviaciones del LSF de estos dos puntos de muestreo, nos indica qué tanto se homogeniza el material dentro del silo:

$$\text{Factor de homogenización} = \frac{\text{Desviación estándar LSF en la entrada del silo}}{\text{Desviación estándar LSF en la salida del silo}}$$

Tabla IV. **Factor de homogenización**

<b>Factor de homogenización</b>	
< 1	El silo de homogenización no está realizando su trabajo, y el material en la descarga del silo es más heterogéneo que en la entrada del mismo.
= 1	El silo de homogenización descarga el material con la misma homogeneidad que en la entrada.
> 1	El silo de homogenización se encuentra realizando su trabajo, ya que el material de salida posee una menor desviación estándar que en la entrada del silo.

Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

Según los valores manejados en otras plantas de cemento asociadas al grupo Holcim, los valores de la desviación estándar de harina cruda en la salida del molino (entrada al silo) y entrada al horno (salida del silo) deben estar de acuerdo a lo siguiente:

Tabla V. **Valores recomendados desviación estándar de harina cruda**

<b>Muestras Horarias (Promedio diario)</b>		
Alimentación del horno / Clinker	Desviación estándar LSF	< 1.2
Harina Cruda	Desviación estándar LSF	< 3.6

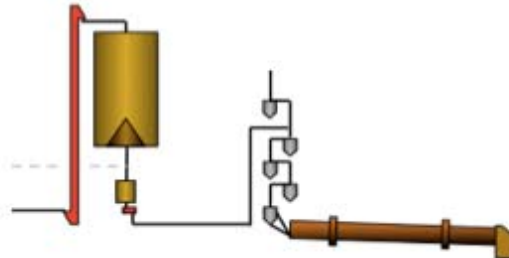
Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

Según los valores de la tabla anterior, se obtiene como valor recomendado de factor de homogenización 3.

#### **4.6.2.4. Tratamiento experimental 1: Uso de recirculación**

Usualmente los silos de homogenización son alimentados por la descarga del molino de harina cruda (elevador de canjilones en color rojo), y descargan hacia la torre de ciclones del horno, se presentan como en la siguiente figura:

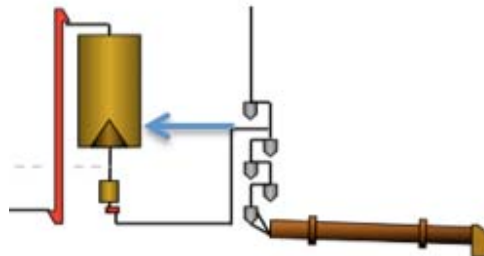
Figura 34. **Alimentación convencional de un silo de homogenización y descarga hacia torre de ciclones**



Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

El tratamiento experimental se realizará agregando un retorno de la salida del silo, antes de llegar a la alimentación del horno, en la siguiente figura se representará con una línea azul.

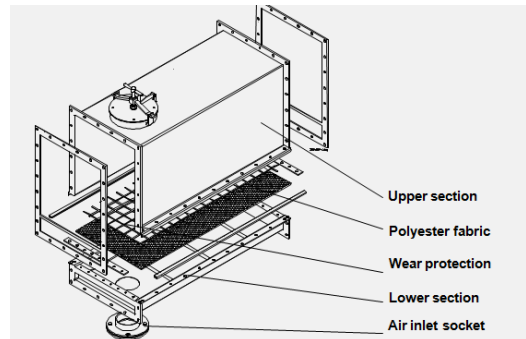
Figura 35. **Alimentación de un silo de homogenización con recirculación y descarga hacia torre de ciclones**



Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

Físicamente la descarga en el fondo del silo se realiza por medio de “*airslides*”, conocidas como regueras, estas poseen aireación por medio de sopladores, son cajones metálicos que en el fondo tienen una lona por donde el material pasa hacia su destino.

Figura 36. **Reguera**



Fuente: LABAHN, O. & Kohlhaas, B. *Prontuario del Cemento*. 398 p.

Las regueras descargan a un elevador de canjilones y este a la torre de ciclones. En el caso del tratamiento experimental, el elevador que alimenta la torre de ciclones del horno, también descarga hacia una reguera que retorna hacia el silo. A continuación se presenta un presupuesto para la realización de la reguera que retornará la harina cruda del elevador de canjilones hacia el silo.

Tabla VI. **Presupuesto para reguera de 2" (0.031m) de ancho**

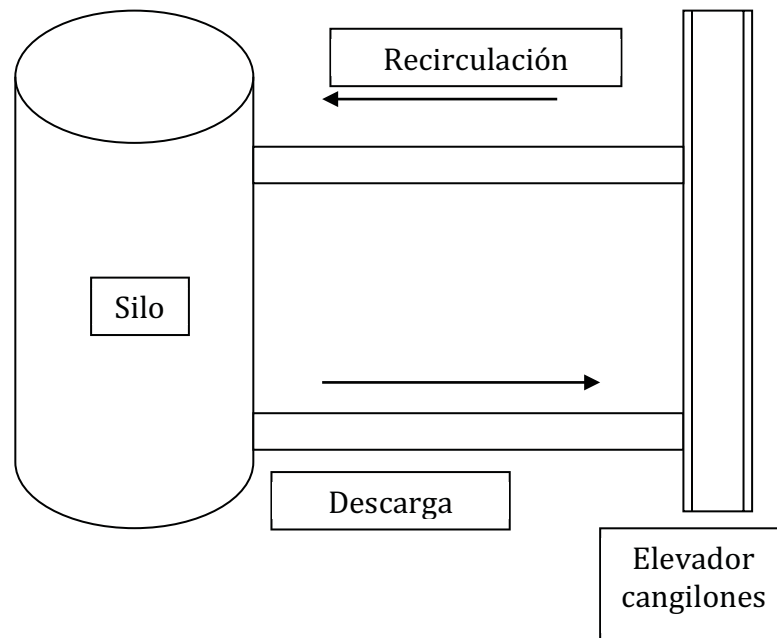
<b>Materiales</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
Lamina negra 1/4" x 4 pies X 8 pies	8	Unidades	\$121	\$965
Tornillería 5/16"	80	Unidades	\$3	\$186
Lona 24"	20	pie lineal	\$21	\$420
Soportería Chanel 1/4" X 2 1/2"	20	pie lineal	\$19	\$380
Ventilador 5Hp (3.73 kW)	1	Unidades	\$981	\$981
Materiales eléctricos	4	Unidades/kW	\$150	\$600
<b>Total Materiales</b>				\$3,532
<b>Mano de Obra</b>				
Fabricación de reguera	20	pie lineal	\$19	\$375



Continuación de la tabla 6.				
Montaje de reguera	5	Tonelada	\$157	\$785
Montaje de accionamiento	4	KW	\$94	\$375
Instalación de Sistema de control	1	Unidad	\$312	\$312
<b>Total Mano de obra</b>				\$1,847
<b>Total de una reguera de 20 pies lineales</b>				\$5,323

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Tratamiento 1: recirculación**

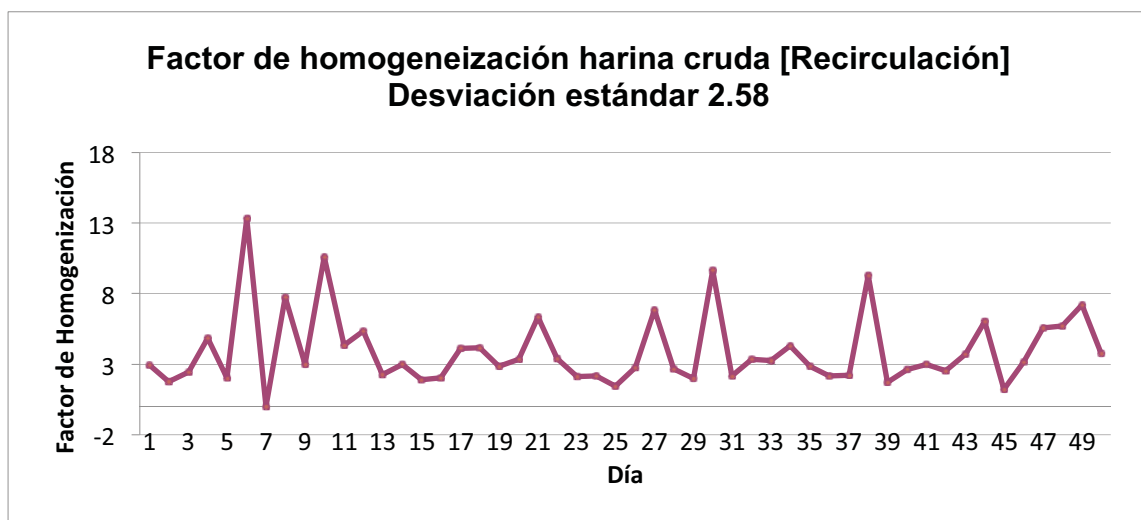


Fuente: elaboración propia.

- Objetivo del tratamiento experimental: encontrar el factor de homogeneidad para condiciones de recirculación y para cuando no se tiene la misma. De acuerdo a los resultados de la desviación estándar del

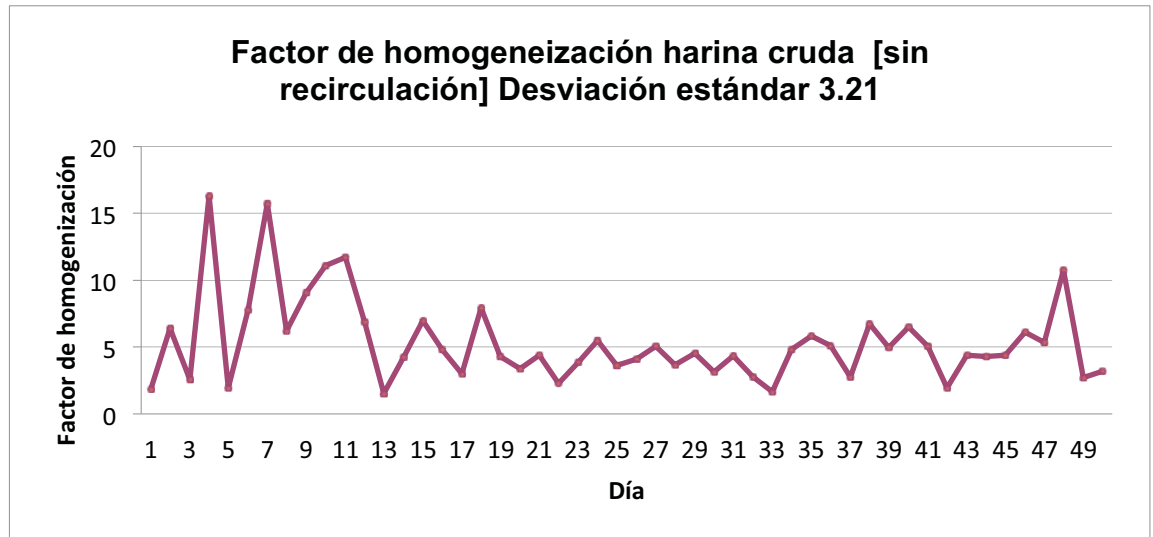
factor de homogeneidad con respecto al promedio se seleccionaron las condiciones del tratamiento que favorecieran la disminución de la desviación, dando como resultado un material mejor homogenizado.

Figura 38. **Correlación factor de homogenización en condiciones de recirculación**



Fuente: elaboración propia.

Figura No. 39. **Correlación factor de homogenización en condiciones de NO recirculación**

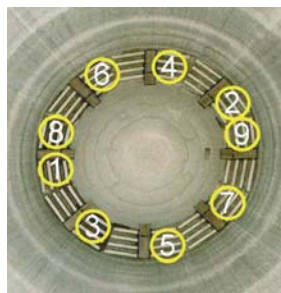


Fuente: elaboración propia.

#### 4.6.2.5. Tratamiento experimental 2: secuencia de descarga

La forma de descarga del material hacia las regueras que transportan la harina cruda a la torre de ciclones se explica en el marco teórico, y esta difiere según cada silo.

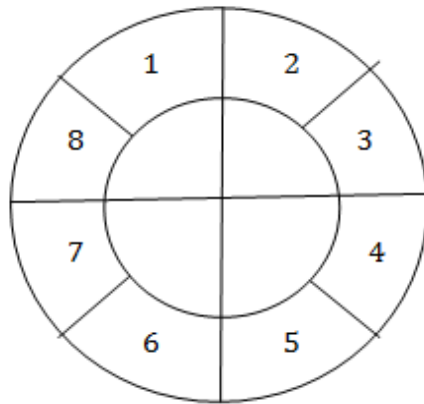
Figura 40. **Ejemplo de descargas vistas desde dentro del silo**



Fuente: CEMENT INTERNATIONAL. <http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-7a.PDF> 22 de abril de 2011.

En el caso de el silo en estudio, se tienen 8 descargas en el fondo del silo, que se conducen a una reguera principal, de las cuales se abre una a la vez. Se pueden programar distintas secuencias de descargas, como en la figura anterior, se enumeraron las descargas en el orden en que van accionando cada una.

Figura 41. **Enumeración de las descargas de silo**

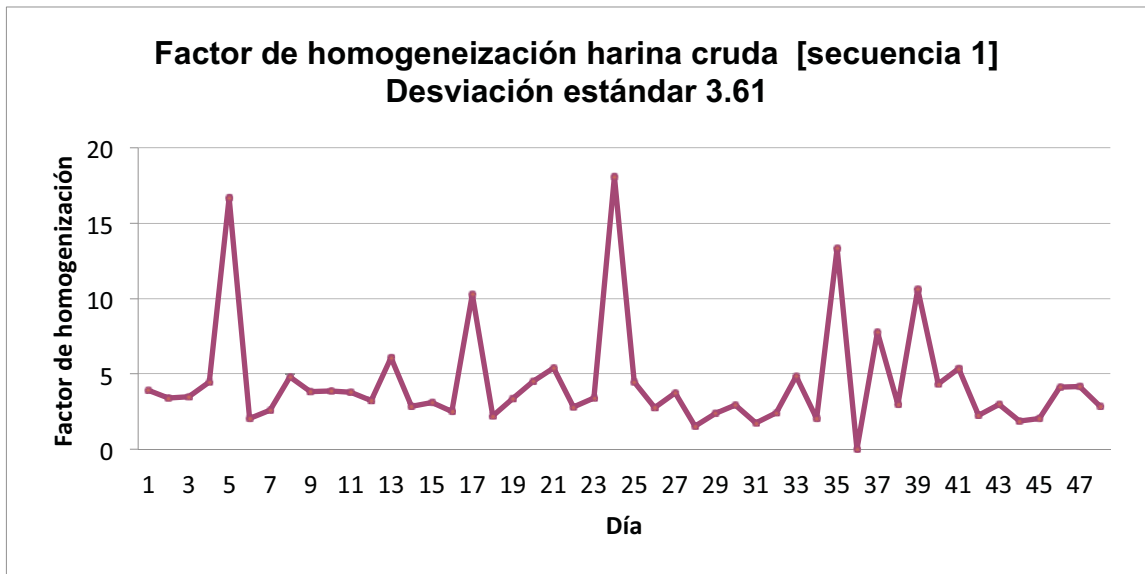


Fuente: elaboración propia.

Para mejorar la operación en el silo, se prepararon dos tipos de secuencia de descarga, fue necesario operar un tiempo estimado de 50 días con cada una de ellas para encontrar cual fue más efectiva. La más efectiva es la que previene la intersección de embudos en el interior del silo para garantizar la homogeneidad del material.

- Secuencia 1: secuencia de accionamiento de las descargas, según Figura No. 41 : 1, 4, 7, 2, 5, 8, 3, 6, esta secuencia implicaría un orden de accionamiento de las descargas dejando dos válvulas cerradas de por medio, por cada una que se abra.

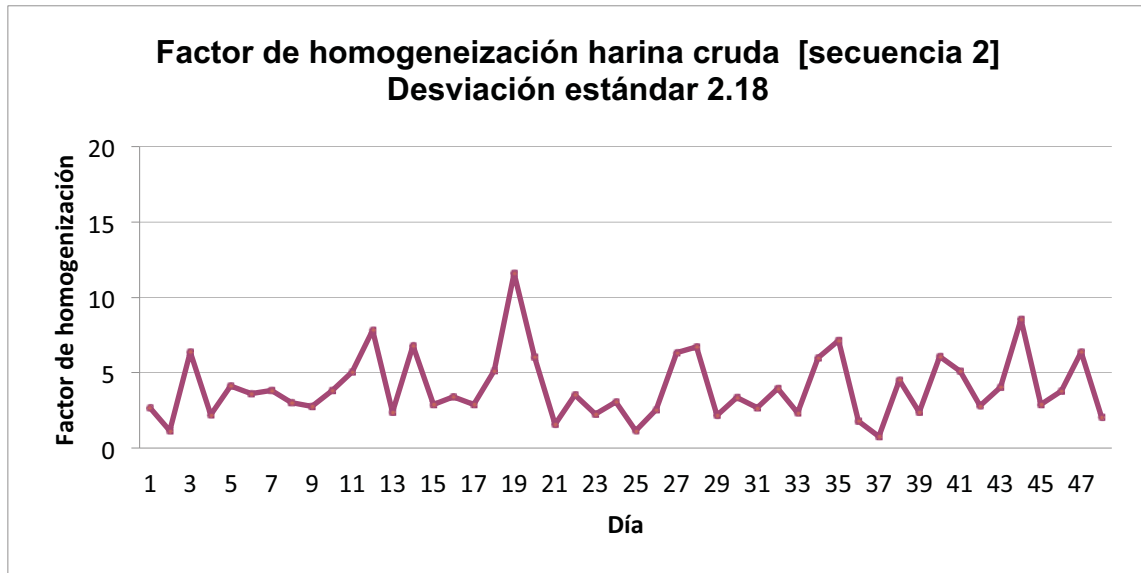
Figura 42. **Correlación factor de homogeneización en condiciones secuencia 1**



Fuente: elaboración propia.

- Secuencia 2: secuencia de accionamiento de las descargas, según Figura No. 41: 1, 5, 8, 4, 7, 3, 6, 2, esta secuencia implicaría un orden de accionamiento de las descargas dejando tres válvulas cerradas de por medio, por una que se abra luego dos válvulas cerradas de por medio por una que se abra, y después volviendo a empezar la secuencia.

Figura 43. **Correlación factor de homogenización en condiciones Secuencia 1**



Fuente: elaboración propia.

- Objetivo del tratamiento experimental: encontrar el factor de homogeneidad para cada una de las secuencias. De acuerdo a los resultados de la desviación estándar del factor de homogeneidad con respecto al promedio se seleccionaron las condiciones del tratamiento que favorecieran la disminución de la desviación, dando como resultado un material mejor homogenizado.

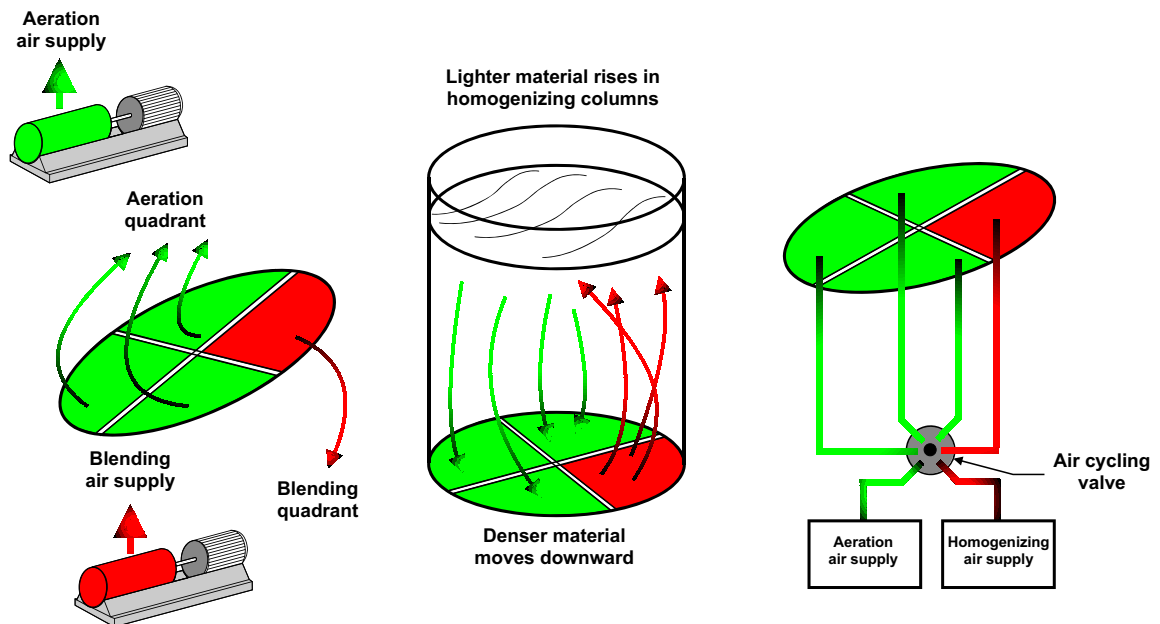
#### **4.6.2.6. Tratamiento experimental 3: tiempos de aireación**

Como se explicó en el marco teórico, los silos de homogenización poseen en el fondo circular, cuatro cuadrantes los cuales son suplidos de aire por sopladores, en este caso particular con capacidades definidas en la fase I del diseño metodológico. Uno de los sectores es aireado con mayor potencia (en

figura 44, cuadrante en oscuro) que los demás (en figura 44, cuadrantes claros) durante cierto tiempo, posteriormente cambia al siguiente cuadrante y así sucesivamente. Esto permite que el material fluya (Ver anexo 1).

Este tiempo de aireación es una variable fundamental por la cual puede cambiar la homogenización dada en el silo.

Figura 44. Aireación dentro del silo



Fuente: PRE-BLENDING OF RAW MATERIALS. Holcim Group Support Ltd. Suiza 2011.

- Tiempo 1: la aireación activa permanecerá por 3.5 minutos y luego cambiará de cuadrante.
- Tiempo 2: la aireación activa permanecerá por 8 minutos y luego cambiará de cuadrante.
- Objetivo del tratamiento experimental: encontrar el factor de homogeneidad para cada tiempo de aireación. De acuerdo a los

resultados de la desviación estándar del factor de homogeneidad con respecto al promedio se seleccionaron las condiciones del tratamiento que favorecieran la disminución de la desviación, dando como resultado un material mejor homogenizado.

#### **4.6.3. Fase III recopilación de datos: estimación de datos de costos**

- Se encontró el costo del KWh en el momento de la realización de la investigación: \$0.17
- Se estimó el costo de la energía para el sistema convencional de homogeneización. (Ver Resultados)
- Se estimó el costo de la energía para el sistema CP de homogeneización. (Ver Resultados)
- Se estimó costo por disminución de consumo energético en la utilización del sistema CP. (Ver Resultados)
- Se calculó el Valor Presente Neto para la inversión de la reguera usada en el factor tratamiento de “Recirculación”.  
VPN = \$97,192
- Se calculó tiempo de retorno de la inversión del tratamiento experimental  
1 “recirculación” : 0.41 meses ó 12 días



- Se calculó el índice de Retorno de la Inversión ROI (*Return on investment*): 148%

#### **4.7. Técnica cuantitativa**

El modelo cuantitativo de diseño del experimento son los tratamientos experimentales descritos en la fase II del experimento, este es el modelo de efectos fijos.

Los efectos tratamientos que han sido seleccionados para estudiar en la variable de respuesta se comparan con la variable independiente “factor de homogenización” para llegar a una conclusión.

#### **4.8. Procesamiento de la información**

Los datos obtenidos se analizaron y ordenaron como se muestra a continuación.

##### **4.8.1. Plan de tabulación**

Se muestra a continuación un cuadro y el detalle del plan de tabulación de datos obtenidos.

Tabla VII. **Cuadro de recolección de datos**

<b>Tipo</b>	<b>Nombre</b>
Cuadro	Potencia compresores silo convencional
	Potencia compresores silo CP
	Costo por consumo eléctrico en silos
Gráfica	Factor de homogeneización del material en prueba de recirculación / no recirculación
	Factor de homogeneización del material en prueba de secuencias
	Factor de homogeneización del material en prueba de tiempos de aireación de compresores

Fuente: elaboración propia.

- Costo disminuido por utilización del sistema CP
  - Cálculo del costo en el sistema convencional
  - Cálculo del costo en el Sistema CP
  - Disminución en el costo
  - Tiempo de retorno de inversión
  
- Consumo energético
  - Cálculo de la diferencia de potencia entre el sistema convencional y el sistema CP
  
- Condiciones óptimas de operación en Sistema CP
  - Homogeneidad del material
  - Factor de homogeneización
  - Factor tratamiento
  - Recirculación

- Secuencia de descarga
- Tiempo de aireación activa
- Análisis de operación
  - Condiciones óptimas de operación

#### **4.9. Análisis estadístico**

El análisis estadístico se llevará a cabo por medio de la obtención de los errores de los datos de factores de homogeneidad, los cuales se estimarán para los resultados finales

Se calculará el error por incertidumbre, en dimensional porcentual para los datos de costo y consumo energético.

Una asignación razonable de errores a las magnitudes medidas depende de numerosos factores que no se pueden especificar aquí en detalle. Sin embargo, como norma general, dependerá de si las mediciones se efectúan directamente o si se obtienen tras la aplicación de relaciones matemáticas entre otros valores previamente medidos (medidas indirectas).

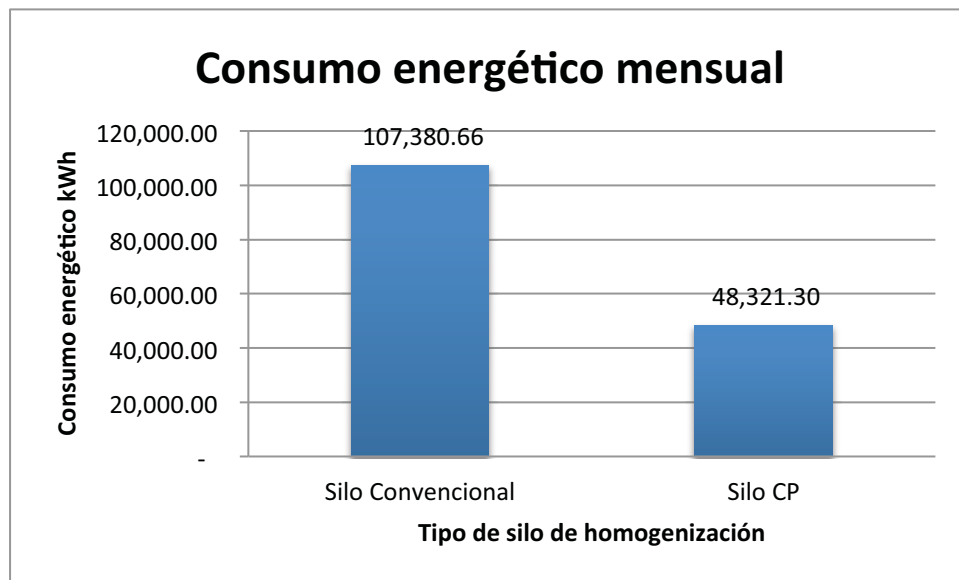
##### **4.9.1. Validez durante el experimento**

Para garantizar la validez durante el experimento en la primera fase, se tomarán los datos de las bases de datos de los motores y compresores del área en planta. En cuanto al dato de costos para la segunda fase, este será tomado del dato de promedio mensual de costo por kWh según el contrato para la planta en el Sistema Nacional Interconectado.



## Resultados

Figura 45. Gráfico Consumo energético mensual



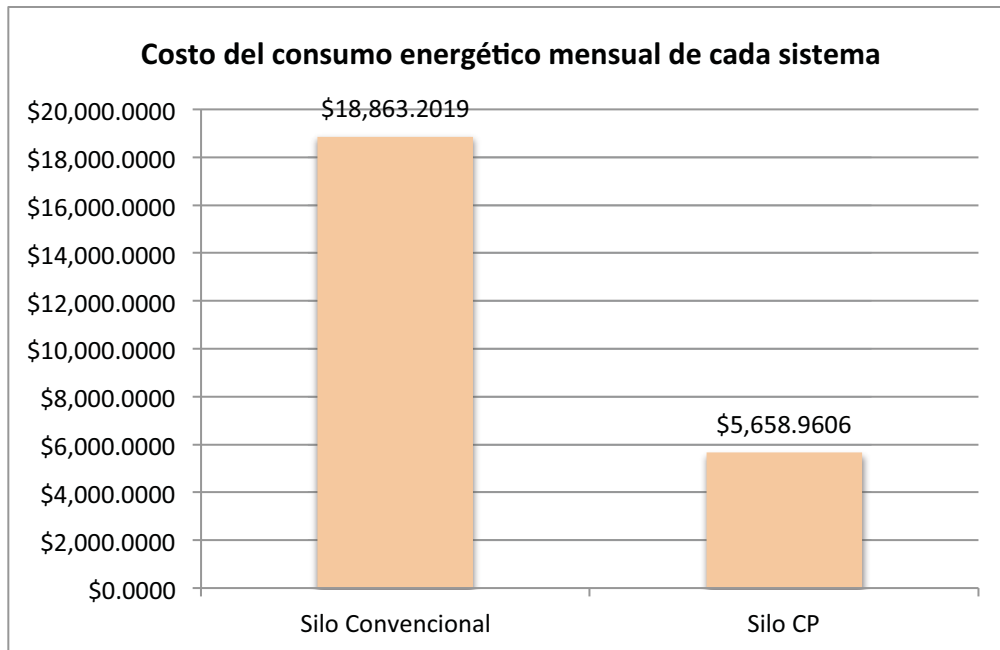
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Disminución en el consumo energético usando el sistema CP

Consumo diario Silo Convencional [KWh]	Error de precisión por incertidumbre [KWh]	Consumo diario Silo CP [KWh]	Error de precisión por incertidumbre [KWh]
107,380.66	±57,60	48,321.30	±86,40
<b>Disminución de consumo energético</b>			
37.31%			

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Gráfico Costo mensual disminuido en consumo energético en la utilización del sistema CP**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Costo mensual disminuido en consumo energético en la utilización del sistema CP**

Silo Convencional	Silo CP
\$18,863.2019	\$5,658.9606
<b>Costo disminuido [USD]</b>	
\$13,204.241	

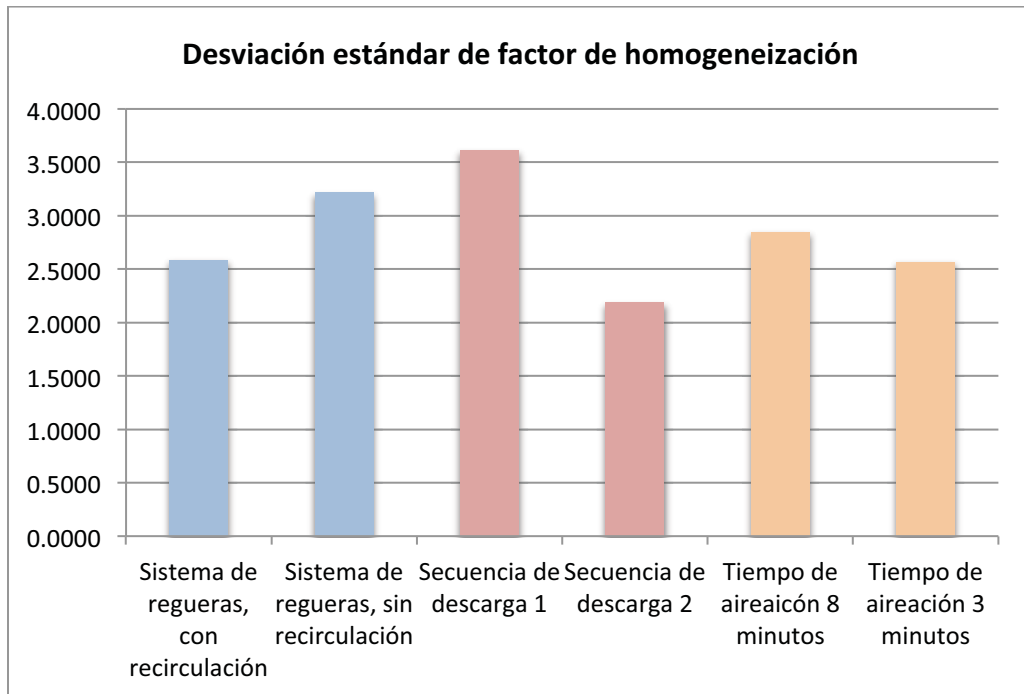
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Índices financieros del proyecto

ROI	Período de recuperación de la inversión	VAN
248%	0.4 meses	\$97,192

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Gráfico de desviación estándar de factor de homogenización, según los tratamientos experimentales



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Condiciones para mejorar el factor de homogeneidad**

<b>Condiciones óptimas de operación del sistema CP</b>			
<b>Tratamiento experimental</b>	<b>Factor de homogenización</b>	<b>Desviación estándar de factor de homogeneización</b>	<b>Condición óptima</b>
Sistema de regueras, con recirculación	3.9456	2.6194	<input checked="" type="checkbox"/>
Sistema de regueras, sin recirculación	5.3535	3.2173	.
Secuencia de descarga 1	4.4624	3.6153	.
Secuencia de descarga 2	4.0313	2.1871	<input checked="" type="checkbox"/>
Tiempo de aireación 8 minutos	4.9408	2.8464	.
Tiempo de aireación 3 minutos	3.7997	2.5662	<input checked="" type="checkbox"/>
Promedio para las condiciones óptimas	3.9255	2.45	

Fuente: elaboración propia.



## Interpretación de resultados

La industria cementera necesita de grandes cantidades de energía en todas sus formas, siendo el principal componente en el costo de fabricación del cemento. La empresa desea aumentar su competitividad, reduciendo estos costos.

Se tiene en este tipo de industria, el consumo derivado de la energía térmica a base de combustibles fósiles o alternos y el consumo eléctrico. Generalmente, estos dos tipos de costos son los más inestables y difíciles de controlar, ya que los costos térmicos por un lado dependen del precio internacional de los combustibles fósiles, y por otro lado, el precio de la energía eléctrica depende tanto de la matriz energética del país, como de la eficiencia de la tecnología de generación de los contratos con la que cada industria trabaje.

Algunas operaciones en la fábrica de cemento presentan un consumo muy reducido respecto al consumo global de la instalación, pero tienen una incidencia notable en el consumo de otras operaciones, como ocurre con la homogenización de harina cruda para la alimentación al horno, de cuya eficiencia depende la marcha regular del proceso de clinkerización. La finalidad del presente trabajo fue validar el uso del sistema de homogenización tipo CP en lugar del sistema convencional de homogenización debido al ahorro de energía eléctrica que provee, esto por medio de la optimización de la operación de sus variables.

En conjunto, el sistema de homogenización y el horno, consume aproximadamente 21% del total de la energía eléctrica en el proceso de fabricación de cemento. Aquí es donde se incluyen los consumos de potencia de los motores de los compresores para los silos de homogeneización de harina cruda. Los dos sistemas que se trabajan en planta, el convencional y el sistema CP funcionan de manera diferente, lo cual se ve reflejado en la disminución del consumo energético calculado a partir de la capacidad nominal de los compresores que se utilizan para aireación (el apéndice 1 muestra un resumen de los datos calculados de energía y costo).

- Consumo energético:
  - Mientras el silo convencional consume diariamente 107,380 KWh  $\pm$  57.6 KWh, el silo con el sistema CP consume 48,321 KWh  $\pm$  86,4, lo cual significa un 37.93% menos de energía consumida al utilizar el sistema de homogenización CP en lugar del sistema convencional. Se sabe que esto es debido a que el sistema CP utiliza un área activa de aireación por tiempos definidos en el sistema de control de descargas así como también compresores de menor capacidad que fluidizan y homogenizan alternadamente cada sección.
  - La utilización de energía eléctrica en una determinada industria no impacta solamente en los costos del producto, sino también impacta directamente en el medio ambiente, esto depende de la tecnología de las generadoras con quienes se tiene un contrato, en el caso particular de la industria cementera, de energía hidroeléctrica y energía a base de bunker. Dado que trabajar con bunker genera emisiones al ambiente, principalmente de CO<sub>2</sub>, cualquier ahorro de energía eléctrica, se traduce en reducción de daños ambientales.

- Impacto ambiental: disminuir el consumo energético mensual en 59,000 KWh utilizando el sistema CP se traduce en una reducción de aproximadamente 27 toneladas de CO<sub>2</sub> al mes.
  
- Condiciones de operación:
  - El utilizar un sistema de homogenización que requiere menos energía pero que ha tenido problemas para entregar un producto con la homogenización deseada, implicó la realización de prácticas experimentales para mejorar la calidad y uniformidad de la harina cruda y al mismo tiempo aprovechar el consumo energético ahorrado al sustituir el sistema convencional.
  
  - La validez de cada tratamiento experimental se comprueba a través de la mejora en la homogenización del material, que se hace posible medir por medio del ratio de la desviación de LSF antes y después de pasar por el silo, es decir el factor de homogenización.
  
  - Según la desviación estándar de los factores de homogeneización para los tratamientos se estableció que en las condiciones de: recirculación, secuencia de descarga 2 y tiempo de aireación de 3 minutos, se obtiene una desviación más centrada hacia un valor común, lo cual indica que la homogeneización mejora notablemente operando con estas condiciones.
  
  - Según la tabla V el valor recomendado de factor de homogenización es 3. Al comparar con los valores obtenidos en los tratamientos experimentales para las condiciones óptimas de operación, el valor obtenido en promedio fue de 3.9, lo cual implica que el desempeño se encuentra desviado en 0.9, aún así se define como aceptable.

- Energéticamente interesa que la reacción de clinkerización tenga lugar a la menor temperatura posible y que sea una reacción rápida. La temperatura puede reducirse aportando una mezcla muy fina y homogénea, que se obtiene con las condiciones de operación encontradas para el sistema de homogenización tipo CP.
- Costos:
  - El precio de la energía eléctrica en Guatemala es uno de los aspectos que influye directamente en los costos de las industrias. Guatemala posee uno de los mercados de energía eléctrica con mayor utilización de combustibles fósiles en América Latina. Estableciendo para el cálculo del costo por consumo energético, \$0.17/kWh, valor del kilovatio-hora contratado durante la realización del proyecto.
  - Si el sistema de homogenización debe trabajar todo el tiempo para estabilizar el material que ingresa al horno, los compresores consumen energía las 24 horas. Se calculó que al utilizar el sistema convencional, se incurre en un costo mensual de \$18,863.20 y al utilizar el sistema CP el costo es de \$5,658.96, al igual que el dato de consumo energético, va influido por la capacidad de los compresores y su sistema de aireación.
  - La forma de operación de los compresores de aireación en el sistema CP hace posible garantizar la homogenización consumiendo menos energía, debido a que los compresores trabajan de forma alternada, siendo uno a la vez que airea activamente una sección y el resto fluidizan el material del resto de sectores para crear movimiento y uniformizar el material.

- En total se obtiene un costo disminuido de \$13,204.24 mensuales por la utilización del sistema CP en lugar del sistema convencional. Esta mejora se obtuvo al realizar las pruebas experimentales para encontrar la mejor forma de operación del silo de homogenización.
- Una de las modificaciones necesarias para producir material con mejor homogenización, requirió la instalación de un transporte de recirculación hacia el silo. La rentabilidad en la inversión en el equipo de transporte se analizó por medio de la aplicación de tres indicadores financieros, los cuales son clave en la administración financiera de un negocio y reflejan claramente la oportunidad de mejora en operación y en costo del proyecto.
- Siendo el resultado del período de retorno de la inversión menor a uno, la instalación del transporte de recirculación se pagó en 0.4 meses, ya que los ahorros mensuales obtenidos en costo de energía eléctrica por la utilización del sistema de homogenización CP son de \$13,204.24, mientras que la inversión fue de \$5,375. Otro de los índices que evidenció la rentabilidad del proyecto fue el índice ROI, retorno sobre la inversión, que compara con un ratio el beneficio obtenido frente a la inversión realizada, para este caso fue de 148%, por lo que en el período de retorno de la inversión se obtiene una ganancia de 1.48 veces más con respecto a los \$5,375 invertidos al inicio del proyecto.
- En el caso del proyecto del transporte de recirculación, el VPN fue de \$97,192, este valor positivo nos indica que el proyecto ha generado mayor beneficio del que ha requerido.



## Conclusiones

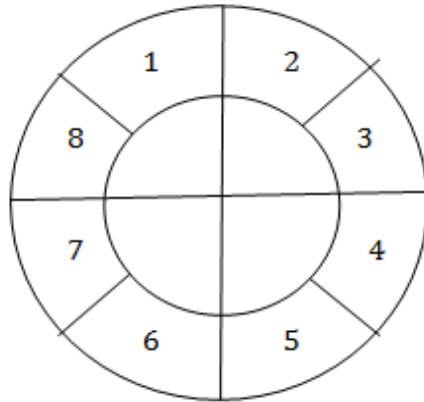
### 1. Consumo Energético

- La disminución del consumo energético por la utilización del sistema CP sobre el sistema convencional es de 37,93%; la cual se calculó en un valor de 3,579.36 kWh para el sistema convencional y de 1610.71 kWh para el sistema CP.

### 2. Condiciones óptimas de operación para mejorar el factor de homogeneidad:

- Con una desviación estándar del factor de homogeneidad de 2.6 al utilizar recirculación, se obtiene un material con mayor uniformidad que cuando el sistema se opera sin recirculación.
- Con una desviación estándar del factor de homogeneidad de 2.2 en el método de secuencia de descarga 2, comparado con el método de secuencia de descarga 1, la homogeneidad del material mejora. Según figura 41 el orden de apertura de cada válvula: 1, 5, 8, 4, 7, 3, 6, 2.

Figura 41. **Enumeración de las descargas de silo**



Fuente: elaboración propia.

- Con una desviación estándar de 2.5 en el factor de homogeneidad para un tiempo de aireación activa de 3 minutos mejora la calidad de material obtenida en el silo.

### 3. Costos

- Se obtiene una disminución mensual de \$13,204.25 en costo al utilizar el sistema CP en lugar del sistema convencional, lo cual representa un ahorro anual de \$158,451.00.
- Con un valor presente neto de \$97,192 y un retorno de inversión de 148%, la inversión realizada en la implementación del transporte de recirculación, se concluye que es rentable favorablemente para la empresa cementera, ya que se recupera dicha inversión en 0.4 meses.



## Recomendaciones

1. Realizar análisis de factor de homogeneidad en el silo de homogeneización manteniendo la calidad de los materiales constante, entre un rango definido de LSF en la pila de homogeneización, para obtener resultados relacionados con la alimentación de material.
2. Monitorear la presión de la cámara central del cono dentro del silo para asegurar la fluidificación y buen mezclado del material en todo momento.
5. Para la realización de los tratamientos experimentales en el silo de homogeneización se recomienda tener un nivel mínimo de 80% para evitar que el peso del material varíe e influya en la fluidificación y homogeneidad del mismo.
6. Utilizar el silo con sistema CP para el abastecimiento de harina cruda para las alimentaciones de las otras dos líneas de producción; o bien analizar la factibilidad de realizar cambios en la estructura de los sistemas de silo convencional para disminuir su consumo energético.
7. Más del 85 % de la electricidad consumida en la industria se debe al consumo de motores eléctricos. Los motores, normalmente funcionan durante muchas horas, por lo tanto seleccionar motores de alta eficiencia y garantizar su correcto funcionamiento, será importante para minimizar el consumo de electricidad. Para esto se pueden seguir los criterios y fases en anexo 2.

8. Se pueden tomar una serie de medidas para reducir el consumo de energía por iluminación, como por ejemplo ajustar correctamente el nivel de iluminación para cada área y tarea a realizar, utilizar siempre un sistema de iluminación eficiente y aprovechar al máximo la luz natural.
  
9. Para ser eficaces es necesario que se lleve a cabo un sistema de gestión estructurado dentro de la empresa. Existen normas internacionales que tienen por objeto proporcionar a las empresas, los elementos de un sistema eficaz de gestión de energía que les ayuden a lograr metas ambientales y económicas, como lo es ISO 50000. La empresa, periódicamente, puede identificar oportunidades de mejora y control de su aplicación y obtener beneficios, según figura 48.

Figura 48. **Beneficios de la aplicación de un sistema de gestión de energía**



Fuente: TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA/AHORRO EN PROCESO . p. 36.

## Bibliografía

1. AIE, OCDE y EUROSTAT. (2007). Manual de Estadísticas Energéticas. Francia.
2. ALDRICH, R. L. (Octubre de 2008). Los Sistemas de Gestión de Emisiones y energía como primer punto de prevención para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. México: CIAFICYP.
3. CAMPOS AVELLA, J. L. (s.f.). *Ahorro de energía en la industria de cemento*. Recuperado en agosto de 2013 del Instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología: [www.si3ea.gov.co/Portals/0Gie/Procesos/cemento.pdf](http://www.si3ea.gov.co/Portals/0Gie/Procesos/cemento.pdf).
4. CARSON, J. &. (1994). *Bulk solids to ensure smooth flow, Chemical Engineering*.
5. *Cement International*. (s.f.). Recuperado el 16 de septiembre de 2013 de [www.sc.ehu.es](http://www.sc.ehu.es).
6. Centro de Estudios de la Energía. *Técnicas de conservación energética en la industria* (Vol. II).
7. COAKLEY, T. D. (s.f.). *Materials use*. Recuperado el 2013 de septiembre de 2013 de [www.iuses.eu/materials](http://www.iuses.eu/materials).
8. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2012). *Informe Estadístico*. Informe Estadístico , CNEE, Guatemala.

9. Comisión Nacional de Energía eléctrica. (2012). *Proyecto de Ley de Eficiencia Energética*. CNEE, Guatemala.
10. (2000). *Diagnóstico Energético*. Dirección Energética, Departamento de la Inspección Estatal Energética, Cuba.
11. DOCKRILL P., F. F. (2001). *Boilers and Heaters: Improving Energy Efficiency*. de Top Motors: [www.topmotors.ch](http://www.topmotors.ch).
12. *Functioning and process engineering design of large silos*. (s.f.). Recuperado el 5 de agosto de 2011 de <http://bobobooks.com/functioning-and-process-engineering-design-of-large-aerated-silos.html>.
13. *Guía para ahorrar energía en sistemas de aire comprimido*. (s.f.). Retrieved 4 de octubre de 2011 from [www.cnpml.org/lucatee/ee/docs](http://www.cnpml.org/lucatee/ee/docs).
14. GOMÁ, F. (1979). *El cemento Portland y otros aglomerantes*. Barcelona, España: Editores técnicos asociados.
15. GUZMÁN CASTRO, F. *Introducción a la Ingeniería Económica*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
16. *Heat recovery with compressed air systems*. (s.f.). Recuperado el 10 de octubre de 2013 de Compressed air Challenge: [www.compressedairchallenge.org/library/factsheets/factsheet10.pdf](http://www.compressedairchallenge.org/library/factsheets/factsheet10.pdf).
17. IAEA, UNDESA, AIE, EUROSTAT y EEA. (2008). *Indicadores energéticos del desarrollo sostenible: directrices y metodologías*. IAEA, Austria.
18. KEECE, E. (1997). *Bulk Solid Handling Chemical Engineering*.

19. F.L. Smith & Co. A/S. (1997). Kiln Operation and Optimisation Course. Guatemala, Guatemala, Guatemala.
20. LABAHN, O. &. (1985). *Prontuario del cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados .
21. *Lección 17: Homogenización del crudo, instalaciones de homogenización*. (s.f.). Recuperado el 20 de septiembre de 2011 de <http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion17.CEMENTOS.HOMOGENIZACION.pdf>.
22. LIRA BRICEÑO, P. (2013). *VPN, El indicador de rentabilidad por excelencia*. Recuperado el 7 de octubre de 2013 de <http://blogs.gestion.pe/deregresoalobasico/2010/09/vpn-el-indicador-derentabilidad.html>.
23. *Manual de eficiencia energética*. (s.f.). Recuperado el 4 de octubre de 2011 de Empresa Eficiente: <http://www.empresaeficiente.com/uploads/publicaciones/ficheros>.
24. MARTÍNEZ, A. V. (s.f.). *Disminución de costes energéticos en la empresa*. Recuperado el 8 de octubre de 2013 de Boiler Source: <http://www.boilersource.com>.
25. *Mezclado de Sólidos*. (s.f.). Retrieved 4 de octubre de 2011 from Recursos: [http://personal.us.es/~mfarevalo/recursos/tec\\_far/mezclado\\_solidos.pdf](http://personal.us.es/~mfarevalo/recursos/tec_far/mezclado_solidos.pdf).
26. MEYERS, S. D. (1993). *Uso de la electricidad en las industrias de cemento, acero y papel: Una perspectiva internacional*. Universidad de California, California.

27. Claudius Peters. (s.f.). *Claudius Peters Mixing Technology*. Recuperado el 5 de agosto de 2011 de <http://www.claudiuspeters.com/page/mixingtechnology/111>.
28. ROTHFUCHS, M. (2011). *Pre-blending of raw materials*. Holcim Group Support Ltd, Mechanical Process Technology Course, Suiza.
29. *Proceso de Fabricación del cemento*. (s.f.). Recuperado el 5 de agosto de 2013 de <http://www.ieca.es/fabcemento.php>.
30. *ROI Return On Investment*. (s.f.). Recuperado el 16 de octubre de 2013 de Gerencie: <http://www.gerencie.com/roi.html>.
31. ROTHFUCHS, M. (2011). *Survey on Homogenizing and Blending Silos and their Operation*. Holcim Group Support Ltd., Mechanical Process Technology Course, Suiza.
32. SCHAFER, E. (2011). *Basic Cement Chemistry, Cement Manufacturing Course*. Holcim Group Support Ltd., Materials Technology, Suiza.
33. SENER y AIE. (2011). *Indicadores de eficiencia energética en México: 5 sectores*. México.
34. *Silo Technology*. (s.f.). Retrieved 5 de agosto de 2011 de Claudius Peters: <http://www.claudiuspeters.com/page/silo/101>
35. URBAR. (s.f.). *Secadores y enfriadores de lecho fluidizado*. Recuperado el 13 de agosto de 2013 from URBAR: <http://www.urbar.com/es/pdf/sec-enf.pdf>.
36. VAN BETHEM, A. y. (2009). Fueling growth: what drives energy demand in developing countries. *The Energy Journal* .

37. VAQUIRO, J. D. (s.f.). *El valor presente neto*. Recuperado el 29 de septiembre de 2013 from Pymes futuro: <http://www.pymesfuturo.com/vpneto.html>.
38. WORRELL, E. G. (2004). *Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making*. Universidad de California, California.
39. WORREL, E. P. (2000). *Energy use and energy intensity of the U.S. Chemical Industry*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Estados Unidos.





## Apéndice 1

Tabla XII. **Cuadro de recolección de datos**

	<b>Costo por consumo eléctrico en silos</b>
Gráfica	Factor de homogeneización del material en prueba de recirculación / no recirculación
	Factor de homogeneización del material en prueba de secuencias
	Factor de homogeneización del material en prueba de tiempos de aireación de compresores

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Potencia compresores silo convencional**

<b>Compresor</b>	<b>Potencia [hp]</b>	<b>Potencia máxima [kWatts]</b>	<b>Consumo energético por día [kWh]</b>	<b>Error de precisión por incertidumbre [KWh]</b>
21-411-CA3	150,0	111,9	2684,5	±1,2
21-411-CA4	50,0	37,3	894,8	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Potencia compresores silo CP**

<b>Compresor</b>	<b>Potencia [hp]</b>	<b>Potencia máxima [kWatts]</b>	<b>Consumo energético por día [kWh]</b>	<b>Error de precisión por incertidumbre [KWh]</b>
SM-413-CA1	30,0	22,4	536,,9	±1,2
SM-413-CA2	30,0	22,4	536,9	
SM-413-CA3	30,0	22,4	536,9	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Costo mensual de consumo eléctrico**

<b>Costo de consumo eléctrico mensual [\$]</b>	
<b>Silo Convencional</b>	<b>Silo CP</b>
\$18 863,2019	\$5 658,9606

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Factor de homogeneización, prueba con recirculación**

<b>Día</b>	<b>Desviación estándar LSF antes del silo</b>	<b>Desviación estándar LSF después del silo</b>	<b>Factor de homogeneización</b>
1	1,9504984	5,7093239	2,927110285
2	4,925944	8,6144344	1,748788536
3	1,1613499	2,8350526	2,441170032
4	0,8423822	4,0665439	4,827433153
5	1,5920122	3,2667698	2,051975368
6	0,4021687	5,3578319	13,32235096
7	0,2710925	0	0
8	1,042234	8,0872452	7,759529115
9	0,7446329	2,2158927	2,975819065
10	0,3950809	4,1946944	10,61730384
11	1,3166291	5,7252821	4,348439592
12	0,4564325	2,4402327	5,346316281
13	1,4623249	3,2780212	2,241650406
14	1,2103314	3,613714	2,985722733
15	1,4455779	2,7165471	1,879211809
16	0,6984856	1,4202558	2,033335907
17	0,9273046	3,8234446	4,123181136
18	0,9008525	3,7448863	4,157047091
19	1,2738409	3,6320256	2,851239503
20	0,7636423	2,5449143	3,33259983
21	0,6387295	4,0581657	6,35349625
22	1,4649003	4,9957042	3,410268971
23	1,5499487	3,2635294	2,105572534
24	0,8790336	1,9052674	2,16745678

Continuación de la tabla XVI.			
25	2,5727312	3,7729855	1,46652921
26	1,4412338	3,9529397	2,742746927
27	0,9730602	6,6796338	6,864564052
28	1,232216	3,3005948	2,678584636
29	1,4166669	2,8465516	2,009330183
30	0,84871	8,1863901	9,645685455
31	1,6402882	3,5300828	2,1521114
32	2,0188821	6,7918815	3,364179426
33	0,9297539	3,0333164	3,262493731
34	1,0096089	4,3469562	4,305584435
35	1,7966661	5,1393362	2,860484918
36	1,4037418	3,0540437	2,17564486
37	1,3692041	3,0503698	2,227841525
38	0,7055274	6,5405657	9,270463299
39	1,2946167	2,2191857	1,714164307
40	0,8233226	2,1688537	2,634269645
41	1,9601156	5,882163	3,000926639
42	1,5828958	4,0395049	2,551971426
43	0,7806045	2,903699	3,719808191
44	0,8637508	5,1918735	6,010846753
45	1,6702394	2,0247999	1,212281273
46	1,7253021	5,4984181	3,186930583
47	0,6639714	3,6956995	5,566052054
48	0,6363597	3,6216647	5,691222808
49	0,8169937	5,900445	7,222142323
50	2,11337	7,9048081	3,740380608

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Factor de homogeneización, prueba sin recirculación**

<b>Día</b>	<b>Desviación estándar LSF antes del silo</b>	<b>Desviación estándar LSF después del silo</b>	<b>Factor de homogeneización</b>
1	1,871082664	3,49214926	1,86637893
2	0,840157037	5,37305228	6,39529522
3	1,379572298	3,56571913	2,5846555
4	0,694111892	11,3226209	16,3123856
5	1,714845481	3,36602066	1,96287111
6	0,623343919	4,86446455	7,8038213
7	0,815359704	12,8518175	15,7621445
8	0,994659311	6,17727172	6,21043975
9	0,714629515	6,49130473	9,08345457
10	0,541685446	6,02026311	11,1139466
11	0,567022318	6,64055752	11,7112807
12	0,950527218	6,54402715	6,88462889
13	2,563937736	3,92081061	1,52921444
14	0,88846047	3,75692221	4,22857554
15	1,364316753	9,49526274	6,9597201
16	1,013859377	4,89420737	4,82730395
17	1,076884309	3,25146542	3,01932658
18	0,82650082	6,56146462	7,93884829
19	1,155594708	4,95985547	4,2920372
20	0,901266218	3,03295455	3,36521495
21	1,559798651	6,84298802	4,38709703
22	1,346720873	3,06757571	2,27781107
23	1,360879949	5,23379738	3,84589205

Continuación de la tabla XVII			
24	1,158062312	6,37502129	5,50490351
25	1,303976794	4,74762618	3,64088242
26	0,811891956	3,32700014	4,09783606
27	0,90400315	4,58084796	5,06729203
28	1,051110945	3,85382037	3,66642588
29	1,057251746	4,77097517	4,51261981
30	1,130063871	3,52973831	3,12348567
31	0,912860313	3,94486034	4,32142824
32	1,415661013	3,88832477	2,74664961
33	2,357249995	3,95961593	1,67976071
34	0,778357654	3,76620009	4,83864977
35	0,984906989	5,74114409	5,82912311
36	0,800596979	4,08036316	5,09665071
37	1,491437409	4,15489809	2,7858347
38	0,952403203	6,4381618	6,75991195
39	0,899095353	4,47018635	4,97187127
40	0,626969063	4,07268735	6,49583464
41	0,755025764	3,81196873	5,04879292
42	1,456745573	2,80983974	1,92884728
43	0,914131053	4,01657298	4,39386997
44	1,094828805	4,71179605	4,30368294
45	1,790728796	7,89286293	4,40762607
46	1,2888398	7,86935654	6,10576779
47	0,598440552	3,20532864	5,35613542
48	0,764171894	8,20793857	10,7409585
49	2,810934114	7,58178315	2,69724684

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Factor de homogeneización, prueba secuencia 1**

<b>Día</b>	<b>Desviación estándar LSF antes del silo</b>	<b>Desviación estándar LSF después del silo</b>	<b>Factor de homogeneización</b>
1	0,84561496	3,29460011	3,89609962
2	0,97393549	3,30453714	3,39297331
3	0,77537295	2,70551473	3,48930761
4	1,31995374	5,90199307	4,47136355
5	0,1605765	2,67854416	16,6807981
6	0,78297179	1,61248032	2,05943604
7	1,2257075	3,1954808	2,60705005
8	1,06199724	5,09854505	4,80090237
9	1,49318114	5,71490102	3,8273327
10	1,284895	4,98416787	3,87904684
11	0,85315185	3,23497744	3,79179561
12	1,68268739	5,45894123	3,24418026
13	1,06067719	6,44620822	6,07744588
14	1,36009796	3,86789721	2,84383724
15	1,09603625	3,37645005	3,08060071
16	1,27694782	3,22739784	2,52743126
17	0,42215405	4,33958969	10,2796353
18	1,30683105	2,88963683	2,21117858
19	1,02604713	3,4653976	3,37742537
20	0,74371253	3,35538523	4,51166965
21	1,03634043	5,60661138	5,41000933
22	0,93281062	2,60040145	2,78770567
23	2,26378244	7,72758418	3,41357192

Continuación de la tabla XVIII			
24	0,47199118	8,54137685	18,0964754
25	0,34112986	1,5174223	4,44822481
26	0,82765888	2,27178077	2,74482742
27	1,38804027	5,17149499	3,72575285
28	1,50939819	2,30369254	1,52623249
29	1,17071725	2,76278358	2,35990679
30	1,95049839	5,7093239	2,92711028
31	4,925944	8,61443439	1,74878854
32	1,16134993	2,83505264	2,44117003
33	0,84238222	4,06654387	4,82743315
34	1,59201219	3,2667698	2,05197537
35	0,40216865	5,35783193	13,322351
36	0,27109252	0	0
37	1,04223402	8,08724519	7,75952911
38	0,74463286	2,21589266	2,97581906
39	0,39508094	4,19469437	10,6173038
40	1,31662909	5,72528208	4,34843959
41	0,45643254	2,44023274	5,34631628
42	1,46232491	3,27802124	2,24165041
43	1,21033142	3,61371403	2,98572273
44	1,44557794	2,71654713	1,87921181
45	0,69848556	1,42025576	2,03333591
46	0,92730455	3,82344463	4,12318114
47	0,9008525	3,74488626	4,15704709
48	1,27384095	3,63202563	2,8512395

Fuente: elaboración propia.



Tabla XIX. **Factor de homogeneización, prueba secuencia 2**

<b>Día</b>	<b>Desviación estándar LSF antes del silo</b>	<b>Desviación estándar LSF después del silo</b>	<b>Factor de homogeneización</b>
1	0,85807812	2,30002149	2,68043368
2	2,4108536	2,80262824	1,16250454
3	0,6457053	4,11966726	6,38010442
4	1,10750559	2,45223807	2,21419927
5	0,84965177	3,50963786	4,13067798
6	1,77201555	6,42043283	3,6232373
7	1,63126732	6,22245114	3,81448893
8	1,32893957	3,99505618	3,00619854
9	0,71830487	1,98964714	2,76992016
10	0,93096035	3,5672095	3,83175234
11	0,6058735	3,07173888	5,06993438
12	1,30520773	10,2246756	7,8337535
13	0,83824383	2,0061902	2,39332534
14	0,49140901	3,33851963	6,79376965
15	1,29933326	3,77410705	2,904649
16	1,33810397	4,56633938	3,41254452
17	2,91449694	8,365376	2,87026413
18	1,34970769	6,9314353	5,13550849
19	0,70505828	8,17508229	11,594903
20	0,87644462	5,26973551	6,01262804
21	2,01531513	3,17972259	1,57777934
22	0,99271908	3,51235952	3,53812027
23	1,50297257	3,37279681	2,24408408

Continuación de la tabla XIX			
24	0,72726691	2,22988093	3,0661108
25	2,48730036	2,88138936	1,15844046
26	1,49790287	3,84756949	2,5686375
27	0,62392162	3,94478837	6,32257042
28	0,87559374	5,8816614	6,71734062
29	2,06397229	4,45274605	2,15736717
30	1,47741778	4,93711217	3,34171704
31	3,77678476	10,0923402	2,67220422
32	0,47495169	1,87168799	3,9407966
33	1,51432714	3,53370228	2,33351314
34	0,84239306	5,04981123	5,99460212
35	0,92929081	6,63938806	7,14457522
36	1,58118558	2,83550265	1,79327632
37	2,21772494	1,70362755	0,76818703
38	1,08340536	4,87565071	4,50030145
39	1,7592475	4,21986463	2,39867593
40	1,20492896	7,33836413	6,09028778
41	2,29381101	11,6444529	5,0764657
42	1,69827205	4,75316871	2,79882643
43	1,5825168	6,3805413	4,03189481
44	1,10988343	9,45246277	8,5166266
45	1,51422661	4,39255627	2,90085793
46	1,61358164	6,13201638	3,80025171
47	0,95503875	6,0929519	6,3797955
48	1,47064361	2,99867563	2,03902265

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Factor de homogeneización, prueba 8 minutos de aireación activa**

<b>Día</b>	<b>Desviación estándar LSF antes del silo</b>	<b>Desviación estándar LSF después del silo</b>	<b>Factor de homogeneización</b>
1	0,5984762	3,64381179	6,08848232
2	0,8004354	3,24241279	4,05081134
3	1,32787692	3,59748598	2,70920137
4	0,3502917	4,68110953	13,3634611
5	1,95216877	6,19224354	3,17198166
6	0,47543074	5,73499047	12,0627255
7	0,56940268	3,92662348	6,89603967
8	1,13841904	7,72350617	6,78441408
9	1,41098193	4,83170428	3,42435589
10	2,85909452	6,46132827	2,25992118
11	1,59851458	7,30749711	4,57142974
12	2,45323095	5,15624463	2,10181786
13	0,867498	3,8230339	4,40696565
14	1,80494228	6,41744516	3,55548498
15	1,70670117	5,46791349	3,20379079
16	0,94387765	4,63861326	4,91442221
17	1,30065363	3,38746386	2,60443194
18	1,50939309	6,04604601	4,00561394
19	0,69630096	3,3513132	4,81302393
20	0,81174497	3,90939668	4,81604055
21	0,63954765	6,47320354	10,1215344
22	1,55246458	4,16213139	2,68098316
23	1,22073356	6,06951307	4,97202113

Continuación de la tabla XX			
24	1,36180455	7,88348237	5,78899693
25	1,63806317	4,61599337	2,8179581
26	0,56156095	3,80929913	6,78341174
27	1,46987656	5,52937522	3,76179563
28	1,52582935	3,99137268	2,61587096
29	2,37701748	3,85220628	1,62060494
30	0,89935735	12,2941994	13,6699827
31	0,44780351	3,52652416	7,87515978
32	2,13048506	13,8130395	6,48351858
33	2,82212832	7,54543911	2,67366975
34	1,1253298	5,8656821	5,21241159
35	0,79009749	3,03546368	3,84188496
36	1,53128304	4,3655359	2,85090071
37	1,01265571	5,25535623	5,1896772
38	1,19699957	11,678065	9,75611461
39	1,38100497	7,23130527	5,23626305
40	1,68589246	4,17375575	2,47569513
41	3,35778273	4,38972794	1,30732936
42	1,5276119	8,12262524	5,31720475
43	4,67177307	14,8547678	3,17968523
44	1,73811477	6,46492901	3,7195064
45	0,71080891	3,42400936	4,81706028
46	1,00750696	2,49334369	2,47476571
47	1,30011201	2,15559862	1,65800993
48	0,73594368	4,52442229	6,14778332
49	0,98656565	7,39076648	7,49140872

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Factor de homogeneización, prueba 3 minutos de aireación activa**

<b>Día</b>	<b>Desviación estándar LSF antes del silo</b>	<b>Desviación estándar LSF después del silo</b>	<b>Factor de homogeneización</b>
1	3,33259983	3,33259983	3,33259983
2	6,35349625	6,35349625	6,35349625
3	3,41026897	3,41026897	3,41026897
4	2,10557253	2,10557253	2,10557253
5	2,16745678	2,16745678	2,16745678
6	1,46652921	1,46652921	1,46652921
7	2,74274693	2,74274693	2,74274693
8	6,86456405	6,86456405	6,86456405
9	2,67858464	2,67858464	2,67858464
10	2,00933018	2,00933018	2,00933018
11	9,64568546	9,64568546	9,64568546
12	2,1521114	2,1521114	2,1521114
13	3,36417943	3,36417943	3,36417943
14	3,26249373	3,26249373	3,26249373
15	4,30558444	4,30558444	4,30558444
16	2,86048492	2,86048492	2,86048492
17	2,17564486	2,17564486	2,17564486
18	2,22784153	2,22784153	2,22784153
19	9,2704633	9,2704633	9,2704633
20	1,71416431	1,71416431	1,71416431
21	2,63426965	2,63426965	2,63426965
22	3,00092664	3,00092664	3,00092664
23	2,55197143	2,55197143	2,55197143

Continuación de la tabla XXI			
24	3,71980819	3,71980819	3,71980819
25	6,01084675	6,01084675	6,01084675
26	1,21228127	1,21228127	1,21228127
27	3,18693058	3,18693058	3,18693058
28	5,56605205	5,56605205	5,56605205
29	5,69122281	5,69122281	5,69122281
30	7,22214232	7,22214232	7,22214232
31	3,74038061	3,74038061	3,74038061
32	1,98910782	1,98910782	1,98910782
33	1,80165339	1,80165339	1,80165339
34	8,53227767	8,53227767	8,53227767
35	3,62415363	3,62415363	3,62415363
36	2,27623372	2,27623372	2,27623372
37	2,7170666	2,7170666	2,7170666
38	4,8309111	4,8309111	4,8309111
39	3,17095229	3,17095229	3,17095229
40	2,82338949	2,82338949	2,82338949
41	2,4439793	2,4439793	2,4439793
42	1,51541325	1,51541325	1,51541325
43	12,9477082	12,9477082	12,9477082
44	2,91084956	2,91084956	2,91084956
45	1,85577026	1,85577026	1,85577026
46	1,22923815	2,28568658	1,85943349
47	2,65046169	2,65046169	2,65046169
48	2,52525554	2,52525554	2,52525554
49	9,61609031	9,61609031	9,61609031

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Desviación estándar de factor de homogeneización en distintos tratamientos**

<b>Tratamiento experimental</b>	<b>Desviación estándar de factor de homogeneización</b>
Sistema de regueras con recirculación	2,619427271
Sistema de regueras sin recirculación	3,217297328
Secuencia de descarga 1	3,615312374
Secuencia de descarga 2	2,187141377
Tiempo de aireación 8 minutos	2,84635611
Tiempo de aireación 3 minutos	2,566240967

Fuente: elaboración propia.





## Anexo 1

### Fluidización o fluidificación

La fluidificación es el estado que se produce en un sólido disgregado cuando, atravesado por una corriente de aire en flujo cruzado, éste se expande, burbujea y las partículas quedan en suspensión, sin llegar al transporte neumático. La fuerza de empuje del aire equilibra el peso de las partículas atravesadas por la corriente; el sólido pasa a comportarse como si fuera un líquido.

Figura 1. **Fluidización o fluidificación**



Fuente: URBAR Ingenieros s.a. Secadores y enfriadores de lecho fluidizado.  
[www.urbar.com/es/pdf/sec-enf.pdf](http://www.urbar.com/es/pdf/sec-enf.pdf). 13 de agosto de 2013.

El fenómeno de la fluidificación permite el mayor intercambio térmico posible, ya que el producto a tratar flota en una corriente de aire. El caudal de aire de secado o enfriamiento atraviesa las partículas y permite la isothermicidad de éstas y una completa transferencia de energía, garantizando el proceso deseado.

## Anexo 2

### **Criterios y fases a seguir para obtener motores eficientes**

#### **Criterio 1:**

La edad del motor. El año de fabricación se puede leer en la placa de identificación o preguntando al fabricante.

#### **Criterio 2:**

Potencia nominal. También tiene que estar anotada en la placa de identificación.

#### **Criterio 3:**

Horas de funcionamiento. El consumo de energía se puede calcular mediante asistencia técnica o leyendo el contador de horas de funcionamiento.

- Fase 1, análisis de consumo: esta fase es la etapa más importante para ahorrar el máximo de energía. Analiza la demanda de energía de los procesos, debate e identifica los parámetros relevantes del proceso con las personas responsables del mismo. Luego identifica la variación del consumo requerido por el proceso realizando alguna medición. Las mediciones se pueden tomar incluso si el proceso no se ha optimizado aún, debido a que la variación relativa tendrá que ser la misma después de la optimización, a no ser que el análisis muestre que el proceso en sí no es el mejor y debiera ser cambiado.
- Fase 2, análisis de la máquina de proceso: el proceso puede ser: vapor, aire comprimido, aire, agua, etc. Las preguntas que se deben hacer son: ¿el

tamaño de la máquina es adecuado al consumo (o está sobredimensionada)? En caso de sobredimensionamiento, la máquina (bomba, ventilador, compresor, etc.) trabaja a cargas parciales lo que conduce a una reducción de la eficiencia.

- Fase 3, control correcto de la máquina: el manejo de la máquina ha de ser adaptado óptimamente a los requisitos de máxima eficiencia. Por regla general se trata de una unidad de frecuencia controlada por bombas, soplantes y compresores.
- Fase 4, optimización del motor eléctrico: existen tres reglas importantes para esta fase: a) la adaptación ideal del tamaño del motor a la exigencia de potencia efectiva, b) la eficiencia del motor ha de ser máxima y c) el control tiene que ser adaptado a las características del consumo

#### Aire comprimido

Por lo general, los compresores están impulsados por motores eléctricos, aunque los compresores muy grandes pueden ser impulsados por turbinas de vapor o gas y los pequeños compresores pueden funcionar con gasolina o diesel. Los compresores son elementos muy ineficientes ya que hasta el 90% de la energía puede perderse como calor residual. El aire comprimido se almacena en un tanque, que actúa como un reservorio o tanque de suministro a una red de tuberías que se encuentran por encima de la presión atmosférica al igual que los instrumentos a los que están conectados.

En la figura 1 se muestran las pérdidas producidas en un compresor. Sólo el 5% del total de la energía se almacena en el aire a presión. El 95% de la

energía se convierte en calor (las pérdidas mecánicas también se convierten finalmente en calor).

Con el propósito de ayudar a minimizar las pérdidas, a continuación se presenta un procedimiento a seguir para tal fin. Dicho procedimiento consta de 4 fases:

### Evitar las fugas

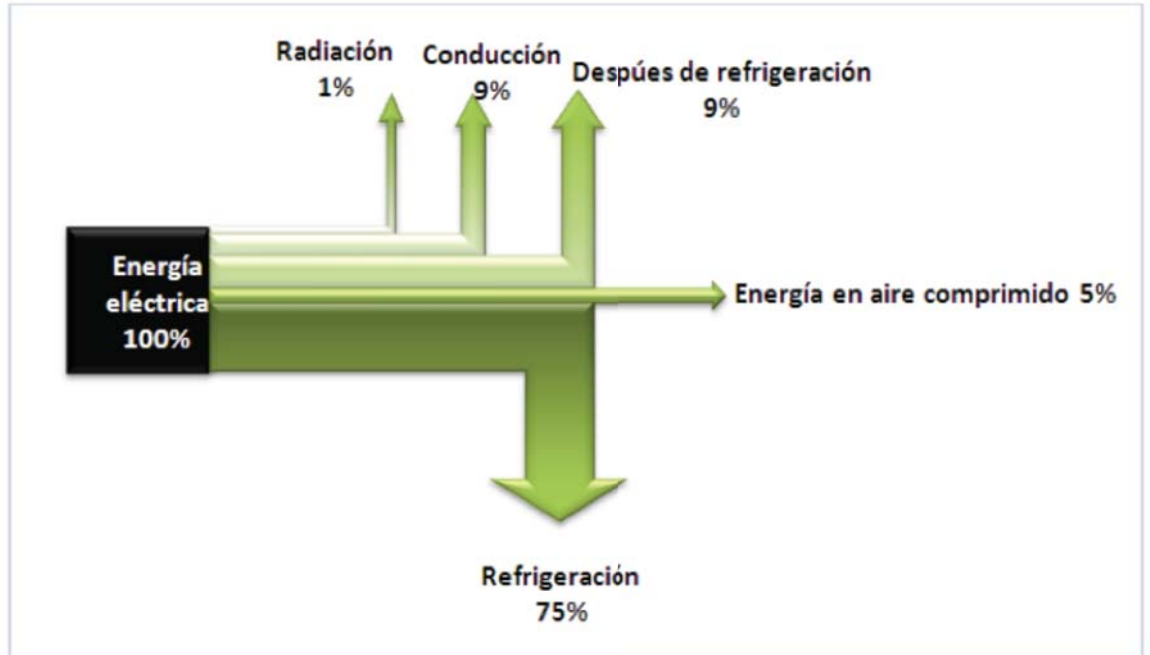
Uno de los principios fundamentales es que la eficiencia de toda instalación de aire comprimido se puede mejorar reduciendo las fugas. Si bien se debe hacer todo lo posible para mantener el sistema sin fugas, siempre existe alguna. Sin embargo, existen varias maneras de reducir la posibilidad de aparición de fugas:

#### ¿Dónde se localizan las fugas?

Principalmente las fugas se localizan en la recogida de condensados, accesorios y tuberías, bridas, colectores, filtros, tubos flexible, puntos de drenaje y purga, etc.

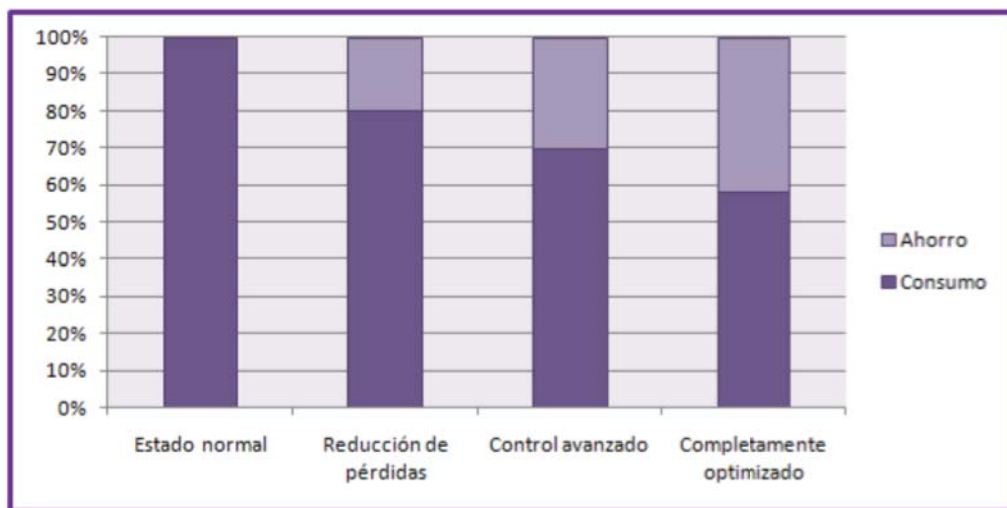
No generar más presión de la necesaria, cuanto más alta sea la presión, más pérdidas se producirán ya que el aire tendrá más facilidad de escapar por poros o pequeños agujeros. No mantener todo el sistema presurizado durante horas no productivas ya que algunos elementos de la maquinaria requieren un suministro constante de aire comprimido.

Figura 1. Balance de energía de un compresor



Fuente: TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA/AHORRO EN PROCESO . p 35.

Figura 2. Ahorro energético de un sistema de aire comprimido



Fuente: TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA/AHORRO EN PROCESO. p. 41.

Aislar las partes del sistema que requieren de aire en distintos momentos. Las válvulas de aislamiento pueden accionarse manual o automáticamente usando simples dispositivos de control como temporizadores o interruptores o también se puede controlar utilizando un sistema de gestión de la energía del edificio, si se tuviera uno.

#### Recuperación de calor

Más o menos el 80-93% de la energía eléctrica consumida por un compresor se convierte en calor. En muchas ocasiones, un buen diseño de la unidad de recuperación de calor puede recuperar alrededor de 50-90% de toda esta energía térmica residual y usarla para calefacción por aire o agua.